

## **Lagring av skogsflis med och utan täckning**

- Substansförlusters påverkan av nederbörd och vind

*Storing wood chips with and without coverage*

- *How dry matter losses are affected by precipitation and wind*

Daniel Wetterholm

Civilingenjörsprogrammet i energisystem

# Lagring av skogsflis med och utan täckning

## Substansförlusters påverkan av nederbörd och vind

Storing wood chips with and without coverage

How dry matter losses are affected by precipitation and wind

Daniel Wetterholm

**Handledare:** Erik Anerud, institutionen för energi och teknik, SLU

**Ämnesgranskare:** Anders Eriksson, institutionen för energi och teknik, SLU

**Examinator:** Åke Nordberg, institutionen för energi och teknik, SLU

**Omfattning:** 30 hp

**Nivå, fördjupning och ämne:** Avancerad nivå, A2E, teknik

**Kurstitel:** Examensarbete i energisystem

**Kurskod:** EX0724

**Program/utbildning:** Civilingenjörsprogrammet i energisystem 300 hp

**Kurskoordinerande institution:** Institutionen för energi och teknik

**Utgivningsort:** Uppsala

**Utgivningsår:** 2021

**Serietitel:** Examensarbete ( Institutionen för energi och teknik, SLU)

**Delnummer i serien:** 2021:10

**ISSN:** 1654-9392

**Elektronisk publicering:** <http://stud.epsilon.slu.se>

**Nyckelord:** Biobränsle, bränslekvalitet, substansförluster, fukthalt, data analys, lagring

Sveriges lantbruksuniversitet

Swedish University of Agricultural Sciences

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap

Institutionen för energi och teknik



## Publicering och arkivering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) vid SLU publiceras elektroniskt. Som student äger du upphovsrätten till ditt arbete och behöver godkänna publiceringen. Om du kryssar i **JA**, så kommer fulltexten (pdf-filen) och metadata bli synliga och sökbara på internet. Om du kryssar i **NEJ**, kommer endast metadata och sammanfattning bli synliga och sökbara. Fulltexten kommer dock i samband med att dokumentet laddas upp arkiveras digitalt.

Om ni är fler än en person som skrivit arbetet så gäller krysset för alla författare, ni behöver alltså vara överens. Läs om SLU:s publiceringsavtal här: <https://www.slu.se/site/bibliotek/publicera-och-analysera/registrera-och-publicera/avtal-for-publicering/>.

☒ JA, jag/vi ger härmed min/vår tillåtelse till att föreliggande arbete publiceras enligt SLU:s avtal om överlåtelse av rätt att publicera verk.

☐ NEJ, jag/vi ger inte min/vår tillåtelse att publicera fulltexten av föreliggande arbete. Arbetet laddas dock upp för arkivering och metadata och sammanfattning blir synliga och sökbara.

## Abstract

In the supply chain for wood chips, storage is a necessary part due to seasonal demand. During storage there are several mechanisms occurring, cell respiration, biological degradation and thermo-chemical oxidative reaction. All of the mentioned mechanisms lead to increased temperature, loss of dry matter and energy. They all thrive under certain conditions where moisture, temperature and oxygen is important factors.

SLU(The Swedish University of Agricultural Sciences) made studies on several piles of wood chips to explore the effect of covering the piles with a water-resistant and vapour-permeable fabric (Anerud, et al., 2018). Rewetting can lead to dry matter losses and energy losses, with this method rewetting can be prevented. This would mean a lower cost when storing wood chips.

This study analyses data from two piles, in Vagersta and Nykvarn, both of the piles were partly covered by this water resistant and semi-permeable fabric. Regression analysis is used to explore the correlation between precipitation and temperature in the piles. Results from collected samples is analysed to compare fuel quality between the covered and uncovered parts and also between periods with higher and lower temperatures. All of this is analysed in upper and lower points of the pile to conclude differences.

Results showed that i Nykvarn where the pile was dry and fresh the uncovered upper part experienced huge temperature spikes after the first rain fall. A daily mean of 145 °C at most and in that part of the pile the dry matter losses was 5,3% after about three weeks of storage. The sample from the lower part showed 2% dry matter losses after three weeks and in the covered part the losses were 1%. After this initial period, rewetting started to affect the lower part of the pile more and higher temperatures were seen there.

In Vagersta the initial moisture content was higher and the material was less fresh. This meant that precipitation did not trigger biological processes to any bigger extent. The first months both temperatures and dry matter losses were similar between upper, lower and

covered points. No connection between precipitation and temperature was seen. The effect of rewetting started to show after that point, temperatures and dry matter losses were higher in the uncovered part.

Conclusions made was that using a semi-permeable fabric can help retain more fuel and therefore lower the cost when storing wood chips. If the pile is dry and fresh, covering can be crucial even for short term storage. The highest temperatures were measured after precipitation on a dry and fresh pile.

## Populärvetenskaplig sammanfattning

Denna studie visar att när skogsflis lagras kan ett täckande material som skyddar mot nederbörd minska nedbrytning av skogsfliset vilket på så vis sparar mer av bränslet. Ett problem vid lagring av skogsflis är risk för brand, denna studie visar att risken är som störst då en torr och färsk stack utsätts för sin första nederbörd. Denna risk kan minskas med rätt täckmaterial.

Skog avverkas året runt men behovet av värme är som störst på vintern, detta gör att skogsflis ofta behöver lagras några månader innan det förbränns. Då skogsflisen lagras påbörjas nedbrytning av materialet vilket gör att bränsle går förlorat. Celandning, kemisk oxidation och mikrobiell aktivitet gör att bränsle går förlorat under lagring. Fukt, syre och temperatur driver dessa processer vilket innebär att om en brist på något av detta skapas så hämmas nedbrytningen.

I denna studie analyseras data från två stackar med skogsflis där halva stackarna var täckta med ett material som skyddar mot nederbörd. Från stackarna analyseras framförallt data på temperatur, fukthalt och substansförluster det vill säga förlorat bränsle. Detta jämfördes med nederbörd och vind för att hitta samband med hjälp av en statistisk metod kallad regressionsanalys.

Något som upptäcktes var att nederbördens påverkan på en stack i stor utsträckning berodde på stackens ingångsvärden när nederbörden inträffar. I Nykvarn var stacken färsk vilket innebär att mycket lättflyktigt bränsle fanns att tillgå och dessutom var stacken torr i början av lagringen. När första regnet kom efter ungefär två veckor av lagring var detta en katalysator för nedbrytning i den övre delen av stacken. Medeltemperaturen de första dygnet var 145 °C och över 5% av bränslet var förlorat efter endast 3 veckors lagring i den övre delen av stacken. Den undre delen av stacken hade däremot fortsatt låg fukthalt, låga temperaturer och låga substansförluster tills senare under lagringen då den övre delen var mer mättad på fukt.

I den täckta delen av stacken var substansförlusterna under samma period 1% i den övre

delen av stacken. Detta visade tydligt hur ett täckmaterial kan skydda mot nedbrytning. Den andra stacken som analyserades låg i Vagersta. Denna stack var mindre färsk och hade högre fukthalt i början av lagringen. Inga dramatiska temperaturförändringar skedde i samband med nederbörd och skillnaden mellan efter 3 månaders lagring var liten både mellan olika delar av stacken och mellan den täckta och otäckta delen. Efter några månader hade temperaturerna börjat falla i den täckta delen medan de höll sig högre i den otäckta delen. Data efter 7 månaders lagring visade högre fukthalter och substansförluster i den otäckta delen så även här hade täckmaterialet stor inverkan i slutändan. Energiförlusterna var ungefär 3% högre i de otäckta delarna jämfört med de täckta delarna både i Nykvarn och Vagersta. Sammanfattningsvis går det således från denna studie att utläsa att nederbörd har stor påverkan när det kommer till substansförluster och brandrisk. Att täcka en stack är därför att föredra.



## Exekutiv sammanfattning

Detta examensarbete undersöker hur lagring av skogsflis kan göras smartare för att minska energiförluster och brandrisk. Genom att analysera data från två stackar där skogsflis lagrats har trender och slutsatser identifierats. Halva stackarna har varit täckta med fiberduken Toptex® som förhindrar vatten att tränga ner i stackarna men tillåter vattenånga att försvinna. Denna fiberduk minskade energiförlusterna med ungefär 3% i båda lagringsförsöken. Dessutom var de högsta temperaturerna betydligt lägre vilket innebär att brandrisken minskade. Om stacken redan är fuktig och lagringen är kortare (omkring 3 månader eller mindre) så är nyttan begränsad, annars rekommenderas detta för att minska energiförluster och brandrisk.

# Innehållsförteckning

<b>1. Inledning</b>	1
1.1 Syfte	3
1.2 Frågeställning	3
1.3 Avgränsningar	4
<b>2. Bakgrund</b>	5
2.1 Litteraturstudie	5
2.2 Bakgrund Nykvarn	12
2.3 Bakgrund Vagersta	14
<b>3. Metod</b>	15
3.1 Nykvarn	15
3.2 Vagersta	17
3.3 Statistisk metod	18
<b>4. Resultat</b>	22
4.1 Nykvarn	22
4.2 Vagersta	32
<b>5. Diskussion</b>	39
<b>6. Slutsatser</b>	45
<b>7. Rekommendationer</b>	47
<b>8. Referenser</b>	48

# 1. Inledning

Biobränslen är förnybara bränslen som kommer från biomassa vilka på sikt inte bidrar till ökande halter av koldioxid i atmosfären vid förbränning.

Sverige är ett land med stora resurser av biomassa, framförallt från skog. Satsningar på biobränsle i Sverige tog fart på 1970-talet, till stor del på grund av oljekrisen 1973.

Anledningarna till bioenergins framfart var att minska beroendet av importerade fossila bränslen och bli mer självförsörjande på energi, samtidigt skulle försurandet av sjöar avta genom denna omställning (Energimyndigheten, 2009). Användandet av biobränslen har fortsatt att öka och var 139 TWh år 2016 där de växande sektorerna de senaste 10 åren varit transporter, elproduktion och fjärrvärme (Energimyndigheten, 2017). Anledningar till att användandet av biobränsle fortsatt öka de senaste decennierna är att koldioxid- och energiskatt infördes under 90-talet, elcertifikatsystem infördes 2003 och utsläppsrätter infördes 2005 (Energimyndigheten, 2017). Dessa förändringar infördes för att göra Sveriges energisystem mer miljövänligt och mindre beroende av fossila bränslen. Sverige uppnådde sitt EU-mål för andel förnybar energi för år 2020 redan 2011 vilket var 49%, omställningen mot förnybart har dock fortsatt och är i dagsläget över 54% (Energimyndigheten, 2017). Sverige har även satt ambitiösa mål för framtiden, senast 2045 ska Sverige inte ha några nettoutsläpp av växthusgaser (Regeringskansliet, 2017). Detta gör att produktionen av förnybar energi behöver fortsätta öka.

Det biobränslet som används mest i Sverige är oförädlad trädbränsle som 2015 stod för 39% av all användning (Energimyndigheten, 2017). Avlutar är en restprodukt från pappersmassaindustrin, de var det näst vanligaste med 33%, därefter kom hushållsavfall och biodiesel med 8%. Oförädlad trädbränsle är antingen skogsbränsle, odlad biomassa eller återvunnet trädbränsle. (Bioenergihandboken, u.d.). Skogsbränsle står för över 90% av primärenergien från oförädlade trädbränslen vilket gör detta till den största bränslekategorin inom biobränsle (Energimyndigheten, 2017). Bland dessa trädbränslen är det gran som avverkas mest årligen, där 53% av den avverkade volymen skog årligen mellan 2011 och 2016 var gran (SLU, 2017). Då oförädlad trädbränsle är den största

kategorin inom biobränsle och gran är det vanligaste trädslaget inom detta är det passande att denna studie gjorts på lagring av flisad gran. En kategori där effektiviserad hantering kan ha stor påverkan.

För att hålla nere kostnaderna på skogsbränsle är en effektiv logistikkedja viktigt. Att utnyttja maskiner på bästa sätt och samtidigt hålla nere transportkostnader är därför centralt (Eliasson, et al., 2017). Skogsbränslet behöver flisas någon gång under tillförselkedjan då ett mer homogent bränsle är önskvärt vid förbränning. Flisningen sker ofta nära avverkningsplatsen, mindre maskiner används då än vid en central lösning vilket är mindre kostnadseffektivt men bulkdensiteten minskas vilket innebär lägre transportkostnader och ofta lägre totala kostnader (Eliasson, et al., 2017).

Transportavstånd kan dock vara avgörande för den optimala lösningen. För att skogsmaskiner ska kunna utnyttjas som bäst sker avverkning under hela året. Under de senaste åren har avverkningen dock varit som störst under hösten. (Skogsstyrelsen, 2018). Efterfrågan på energi från bränslet är som störst under de kallaste månaderna vilket gör att lagring av bränslet är nödvändigt för att matcha utbud och efterfrågan.

Vid lagring av flisat skogsbränsle börjar materialet brytas ner vilket leder till förlorat bränsle. Detta är ett välkänt fenomen som sker på grund av cellandning, mikrobiell aktivitet och kemisk oxidation (Krigstin & Wetzel, 2016). Även höga temperaturer kan uppstå, vilket i vissa fall kan leda till att stackarna med flis börjar brinna. En smartare lagringsprocess med låga förluster kan sänka kostanden för leveranskedjan och då sänka kostanden per levererad energienhet.

Återfuktande av skogsflis under lagring kan öka nedbrytningen då den stimulerar mikrobiell aktivitet. Att täcka flisen med ett kompakt täckmaterial gör att vattenånga inte kan försvinna från stacken vilket gör att fukthalten inte sjunker under lagringsprocessen utan endast distribueras om (Anerud, et al., 2018).

Med detta som bakgrund gjorde forskare på SLU en studie på hur bränslekvaliteten påverkas under lagring då ett delvis genomträngligt täckmaterial används. Materialet var tänkt att skydda mot nederbörd men samtidigt släppa ut avdunstande vattenånga från stacken. Detta kan förhoppningsvis innebära lägre substansförluster och högre

bränslekvalitet efter lagring jämfört med ett referensfall. I studien placerades flertalet temperaturmätare i stackarna och prover hämtades och analyserades under lagringstiden. I detta examensarbete analyseras data från två stackar där delar av stackarna använt sig av täckningsmaterial. Temperaturer och bränsleparametrar jämförs med väderdata för att hitta trender.

## 1.1 Syfte

Examensarbetet syftar till att utöka förståelsen för hur de interna processerna som sker vid lagring av skogsflis förändras under lagringstiden och påverkas av väderförhållandena samt om stacken är täckt eller ej. Med detta som grund ska möjligheter till smartare lagring undersökas där negativa effekter som substansförluster och brandrisk undviks i större utsträckning än i dagsläget.

## 1.2 Frågeställning

- Hur påverkar nederbörd och vind hur temperaturutvecklingen sker i en stack med skogsflis under lagring? Ser det olika ut för olika delar av stacken?
- Hur förändras fukthalter, substansförluster, värmevärden och askhalt under lagring?
- I vilket utsträckning påverkar stackens ingångsvärden vad som händer under lagringen?
- Hur kan lagring ske smartare för att minska substansförluster och brandrisk? På vilket sätt påverkar ett material som skyddar mot nederbörd och är detta att föredra?

### 1.3 Avgränsningar

I detta examensarbete har data analyserats från stackar vid två olika platser och tidsperioder. Detta dikterar vilka slutsatser som kan dras och vilka nya frågeställningar som skapas. Ena stacken lagrades från 12e juni till 13e januari i Vägersta 2013. Den andra lagrades från 9e februari till 16e augusti i Nykvarn 2017. Materialet i båda stackarna var skogsflis från gran. Båda materialen var i samma kategori när det gäller fraktionsstorlek där de klassas som P45 enligt europeisk standard, vilket bland annat innebär att minst 75% av fraktionen har en storlek på 8-45mm (Institute, 2010).

I båda försöken var halva delen av försöksstackarna otäckt och den andra halvan täckt med en duk som förhindrar vatten från nederbörd att nå stacken, samtidigt som duken tillät vattenånga att passera igenom. En fiberduk från Toptex® användes i båda stackarna som väger  $200 \text{ g m}^{-2}$  (Anerud, et al., 2018).

Båda stackarna hade högupplöst temperaturdata med 10-15minuter som intervall från flera mätpunkter. Den data som fanns att tillgå från prover var fukthalter, torrsubstansförluster, värmevärden och askhalter. De väderförhållanden som undersöks är vind och nederbörd då dessa är väderleksförhållanden som är relativt lätta att dämpa om nytta motiverar detta. Även andra väderförhållanden, som luftfuktighet och utetemperatur, kan påverka stacken (Lehtikangas, 1999).

Den statistiska metoden som användes var en tidsserieanalys där samband mellan olika variabler längst en tidsserie undersökts. Den statistiska bearbetningen, behandlar kopplingen mellan nederbörd och temperatur i stackarna. Relevant högupplöst data på vindhastigheter hittades inte, vilket gjorde statistiska samband mindre intressanta. Samband mellan nederbörd eller temperatur i stacken och resultat från proverna analyserades ej med en statistisk modell på grund av att prover hämtades betydligt mer sällan, detta gjorde en statistisk tidsserieanalys irrelevant. Resultat från proverna jämfördes dock med hur nederbörd och temperatur förändrats mellan tillfällena för provtagning för att hitta samband.

## 2. Bakgrund

### 2.1 Litteraturstudie

#### **Bränslekvalitet:**

För att kunna utvärdera effekten av förändringar i ett bränsle behöver förståelsen för bränslekvalitet vara god. Man behöver ha kunskap kring vilka egenskaper som är viktiga hos ett bränsle och hur stor påverkan dessa egenskaper har. Då bränslet ska bli energi i slutändan så är ett högt energiinnehåll önskvärt. Energiinnehåll jämförs vanligtvis med sin vikt vilket kallas värmevärde. Det finns dock olika värmevärden som kan användas beroende på vad som eftersöks. Vikt kan vara begränsande vid transporter men den begränsande faktorn vid transporter kan även vara volym vilket gör att bulkdensitet även används som ett mått på bränslekvalitet, detta är vikt per volymenhet.

#### **Värmevärden:**

Kalorimetriskt värmevärde( $W_k$ ) är skillnaden i energiinnehåll mellan ett bränsle och dess produkt efter reaktion. Det mäts i MJ/kg torrt bränsle och det vanligaste sättet för att mäta detta är med hjälp av en bombkalorimeter. Kalorimetriskt värmevärde är den maximala mängden energi som kan fås ut av ett bränsle. För att nå denna nivå i praktiken krävs fullständig förbränning och rökgaskondensering.

Effektivt värmevärde( $W_{eff}$ ) är ett annat sätt att beskriva energiinnehållet i ett bränsle. Då förutsätts att rökgaserna inte tas tillvara på, och en del av bränslet går således åt till att förångna vattnet som finns i bränslet. Det effektiva värmevärdet kan beräknas enligt *ekvation 1*.

$$W_{eff} = W_k - 2,45 * \frac{9}{100} * H_2 - 2,45 * \frac{F}{100 - F} \quad \textbf{Ekvation 1}$$

2,45= Vattnets ångbildningsentalpi vid 20 °C i MJ/kg

9=Viktökningen från väte till vatten

$H_2$ =Skogsbränslets vätehalt i procent, vanligtvis omkring 6%

Det effektiva värmevärdet kan beskrivas som MJ per kg torrsubstans av bränsle med tillhörande vatten eller MJ per kg råmaterial som består av både bränsle och vatten. Dessa värden skiljer sig ofta väsentligt från varandra vilket gör att det är viktigt att hålla koll på vad det är som eftersöks.

### **Substansförluster**

Substansförluster är ett mått på den torrsubstans av bränslet som gått förlorat, vanligtvis under lagring på grund av nedbrytning. Substansförlusterna är ofta i genomsnitt 2,5-3% per månad under lagring (Gunnarsson, et al., 2016) vilket gör att en smartare lagring kan göra stor skillnad. Substansförluster uppstår på grund av mikrobiell aktivitet, kemisk- eller biologisk nedbrytning.

$$\text{Substansförluster}(\%) = 100 - \left( \frac{\text{Torrsvikt efter}}{\text{Torrsvikt före}} * 100 \right) \quad \text{Ekvation 2}$$

Torrsvikt tas fram genom att torka materialet i 103 °C tills konstant vikt uppnås (Lehtikangas, 1999). Sammanfattningsvis så är detta ett mått på mängden bränsle som förlorats i vikt, inte förlorad energi i bränslet. Förändringar i värmevärde kombinerat med substansförluster kan besvara hur mycket energi som försvunnit ur bränslet.

### **Fukthalt**

Fukthalt är vattnets procentuella andel i vikt av den råa massan. För att mäta fukthalten i ett bränsle mäter man massan före och efter torkning, bränslet torkas som vid mätning av substansförluster i 103 °C tills vikten är konstant. Därefter kan fukthalten beräknas enligt ekvation 3.



$$Fukthalt(\%) = 100 - \left( \frac{\text{torr massa}}{\text{rå massa}} * 100 \right)$$

### **Ekvation 3**

Fukthalt är en viktig faktor för nedbrytning då biologisk aktivitet är beroende av fritt vatten. Fritt vatten är det vatten som finns tillgängligt efter att fibermättnadspunkten är uppnådd vilket är omkring 23% fukthalt (Lehtikangas, 1999). Upp till fibermättnadspunkten används vattnet i cellväggarna (Träguiden, 2017) och en fukthalt över detta är således nödvändigt för nästan all biologisk aktivitet. Hög luftfuktighet bidrar dock till att tillfredsställa mikroorganismers behov av fukt.

### **Askhalt**

Ett bränsle består av en organisk brännbar del men även en icke organisk del som blir kvar efter förbränning. Askhalt anges i viktprocent av bränslets torra massa.

Det finns två typer av aska, naturliga aska och föroreningsaska. Den naturliga askan består av mineralämnena som träden har tagit till sig. Detta är ämnen som finns i marken som kalcium, fosfor, kalium och kväve. I träden så finns den högsta koncentrationen av dessa mineralämnena i bark, löv eller barr vilket är vanliga delar att använda vid förbränning. Kolet och vätet i träden följer ett naturligt kretslopp efter förbränning då nya träd binder dessa i sin uppbyggnad. Mineralerna i askan förs dock inte naturligt tillbaka vilket de hade gjort om träden fick dö och brytas ned i skogen. Dessutom har aska en syraneutraliserande förmåga vilket bidrar till en robust natur. Skogsstyrelsen uppmanar därför till askåterföring om de sker på rätt sätt (Skogsstyrelsen, 2017). Skogsstyrelsen rekommenderar att askan testas för att ta reda på mängd tungmetaller och annat innehåll innan askan sprids.

Föroreningsaska, som exempelvis kan vara sand eller grus, är dock ett problem.

Föroreningsask uppstår framförallt om lagringen inte skett på asfalt och man då skrapat markytan för att samla in det sista bränslet. Återvinningsvirke är ofta förorenat i högre grad än skogsbränsle och kan där uppgå till 15-20% (Ringman, 1995). Problem med föroreningsaska är att det dels kan skada maskiner vid sönderdelning och dels kan det uppstå sintring i pannan (Lehtikangas, 1999).

## **Fraktionsfördelning**

När och hur bränslet flisas eller finfördelas är en viktig del. Vissa anläggningar har svårt att hantera fel storlekar på bränsle, framförallt är stora andelar finfraktion problematiskt. Finfraktion(<7mm) kan sätta stopp i maskiners styr och reglersystem, framförallt om materialet är fuktigt. Finfraktioner kan även skapa en för tät bränslebädd och kan följa med rökgaserna utan att förbrännas (Lehtikangas, 1999). Små bitar bryts även ner snabbare vid lagring på grund av mikrobiell aktivitet, detta då de har en hög ytare/volym.

De nämnda problemen med framförallt finfraktioner gör att bränsleklassning är viktigt, för att klassificera ett bränsle när det gäller fraktionsstorlek används ett såll med flera våningar. Sållen har nivåer med minskande diameter på hålen, 100mm, 63mm, 45mm, 16mm, 8mm, 3,5mm. Efter att bränslet sållats genom detta så mäts hur stor andel av bränslet som fastnat vid varje filter, det mäts i vikt. I denna studie har båda bränslena klassats som P45 vilket innebär att minst 75% av vikten fastnat mellan 8mm och 45mm. Maximalt 8% som är mindre än 3,15mm, maximalt 3,5% som är större än 100mm och allt under 120mm för P45A och 350mm för P45 (Institute, 2010).

## **Mikrobiell aktivitet**

Mikrober, mikrosvampar och bakterier finns runt omkring all biologisk massa. I levande träd finns ett starkt försvarssystem som skyddar där barken är viktig. När materialet är dött, framförallt efter flisning eller annan delning så är försvarssystemet utslaget. Ett finfördelat material har som störst ytare och är maximalt exponerad mot dessa nedbrytande organismer. När mikrobiell aktivitet sker sänds sporer ut i luften vilket i första hand kan skapa problem vid hantering av fuktiga biobränslen. Mögelsporer och olika typer av svampar kan leda till allergiska reaktioner och även sjukdomssymptom som feber, huvudvärk, ledvärk, rethosta och muskelvärk (Arbetskyddsstyrelsens, 1988). Samlingsnamnet för detta är trämögelsjuka och det brukar gå över efter några dagar om exponering mot sporer avslutas. Vilken miljö olika bakterier och svampar föredrar varierar, det är dock temperatur och fukthalt som är styrande. Mögelsvampar lever på lättillgänglig näring som finns på ytan av veden och tränger inte in i biomassan. Optimalt för att alla typer av mögelsvampar ska kunna växa är att fritt vatten finns tillgängligt i

materialet, dock kan många mögelsvampar klara sig utan detta och hämta sin fukt från luften. Mögelsvamp växer och gror sporer då biomassan är inom intervallet 17-60% fukthalt (Lehtikangas, 1999). När det gäller temperatur är variationen för tillväxt stor och vissa typer av mögelsvamp kan växa vid under 0 °C, de mer värmetåliga kan växa vid temperaturer så höga som 55 °C. Mögelsvamp behöver även näring för att växa, där lättillgängliga kolhydrater, enkla sockerarter och vissa proteiner är den huvudsakliga näringskällan. Mögelsvampens förmåga att bryta ner ved är svag, den är dock bättre på att bryta ner barr och löv. Sammantagen innebär detta dock att mögelsvamp inte har någon stor påverkan på substansförlusterna vid lagring.

Till skillnad från mögelsvamp som växer utanpå biomassan så växer rötsvamp och blånadssvamp inne i biomassan. Rötsvamp bryter ner cellväggar vilket får biomassan att ruttna medan blånadssvamp är mindre aggressiv och växer utanför cellväggarna. Båda dessa svampar behöver fritt vatten för att växa, det vill säga en fukthalt över fibermättnadspunkten som är ungefär vid 23% fukthalt. Svamparna får dock problem vid för höga fukthalter, syrebrist kan uppstå och syre är nödvändigt för tillväxten av svampar. Detta gör att det inte bara finns en lägsta fukthalt utan även en högsta. Det kan variera mellan olika arter men för rötsvamp och blånadssvamp är intervallet för tillväxt 23-55% fukthalt (Lehtikangas, 1999). När det gäller temperatur så växer rötsvampar från 0 °C till 40 °C men trivs bäst i intervallet 25-32 °C.

Blånadssvamp växer från -5 °C till 40 °C och optimala temperaturerna är 28-32 °C.

Blånadssvamp använder liknande näringsämnen som mögelsvampen, det vill säga mer lättillgängliga. Rötsvampen är den som står för den största nedbrytningen av materialet och som får trä att ruttna. Rötsvamp kan bryta ner cellulosa och hemicellulosa men vitrötesvamp bryter även ner lignin. Rötsvamp väljer dock i första hand att bryta ner det mest lättillgängliga materialet. Rötsvampen är den primära orsaken till biologisk nedbrytning av biomassa och därmed substansförluster.

Låga fukthalter i biomassa minskar mikrobiologiska aktiviteten men de sporer som blir inaktiva dör inte utan väntar på att få mer tillgång till vatten för att då sätta igång sin aktivitet igen. Detta gör att man kan se dramatiska ökningar av nedbrytning i samband med återfuktning. Ett exempel på aktivitet från svampar är deras andningsaktivitet där

nedbrytningen av glukos beskrivs i ekvation 4. Glukos och syre blir koldioxid och vatten samtidigt som energi frigörs (Jonsson & Jirjis, 1997).



Även bakterier har visat sig att dels kunna finnas kring lagrat trädbränsle dels bryta ner cellulosa. Bakterier än mer värmeteroleranta än svamp och har visat sig kunna klara temperaturer upp till 75 °C. De bakterier som befinner sig runt trädbränslet betar sig som svamp men deras påverkan på nedbrytningen är liten. Den huvudsakliga problematiken med bakterierna är hälsorisker (Lehtikangas, 1999).

### **Biomassans andning**

Levande celler i biomassan kan utföra cellandning även efter avverkning. Cellandning är en naturlig del hos alla växter för att skapa energi där glukos och syre används enligt ekvation 4. Detta bidrar till substansförluster och värmeutveckling precis som när mikroorganismer utför cellandning. En tidigare studie kring lagring av salixflis har gjorts där andningsaktivitet studerades samt i vilken utsträckning detta berodde på biomassans andning (Jonsson & Jirjis, 1997). Andningsaktiviteten mättes genom CO<sub>2</sub>-sensorer. Jämförelse mellan ytsteriliserade och normalinfekterade växter gjordes för att kunna uppskatta växtcellernas del i andningsaktiviteten. I denna studie testades fraktionsstorlekarna 3-7, 7-16 och 16-22 mm där mindre fraktionsstorlek innebar högre cellandning åtminstone de första 40 dyggen. Olika temperaturer på omgivning testades (5, 10 och 15 °C) där högre temperaturer ledde till mer cellandning och högre substansförluster. Den ytsteriliserade salixflisens cellandning var ungefär 30% av den normalinfekterades under de första 5 dyggen. Efter 5 dagar ökade cellandningen i den steriliserade salixflisen, efter 12 dygn så hittades dock mögelsporer i den steriliserade delen vilket tyder på att mögelsporerna är orsaken till ökande andningsaktivitet. Enligt tidigare studier så är andningsaktiviteten i levande växtceller den huvudsakliga orsaken till den initiala värmebildningen som brukar uppstå vid otorkad massaflis. Det behövs mer forskning kring hur länge växtcellerna lever och i vilken utsträckning de står för andningen i senare skeden av lagring.

## **Kemisk oxidation**

Kemisk nedbrytning kan bero på flera olika oxidationsreaktioner som hydrolys eller pyrolys. Hydrolys innebär att en bindning delas med hjälp av vatten, vilket gör att två nya molekyler återstår och energi frigörs. Pyrolys är en syrefri upphettning där molekyler delar sig utan förbränning, flyktiga gaser försvinner och energi frigörs. Pyrolys behöver temperaturer över 100 °C för att kunna bryta ner lignin och omkring 220 °C för att bryta ner hemicellulosa i en betydande takt. Dessa reaktioner behöver värme för att bryta de initiala bindningarna men därefter skapas det en kedjereaktion. Längre kolkedjor bryts ner till kortare kedjor för att sedan fortsätta brytas ned, i varje steg avges värme (Guo, 2013). Kemisk nedbrytning kan ske även vid lägre temperaturer men reaktionstakten ökar vid stigande temperaturer. Kemisk nedbrytning har en viss betydelse redan vid 40 °C men har den primära betydelsen vid temperaturer över 50 °C eftersom den biologiska nedbrytningen samtidigt minskar.

Om värme tillkommer snabbare än vad den hinner föras bort så ökar temperaturen och detta kan tillslut leda till självantändning. Det är därför viktigt att luft kan flöda genom stacken, en för hårt packad stack gör att värme har svårt att ledas bort från ett område och risken för självantändning ökar. Dock så innebär väldigt låga syrenivåer en långsammare nedbrytning då syre behövs för vissa processer. Om en stack redan brinner kan det vara förödande att tillföra syre då detta påskyndar processen.

## **Rökgaskondensering**

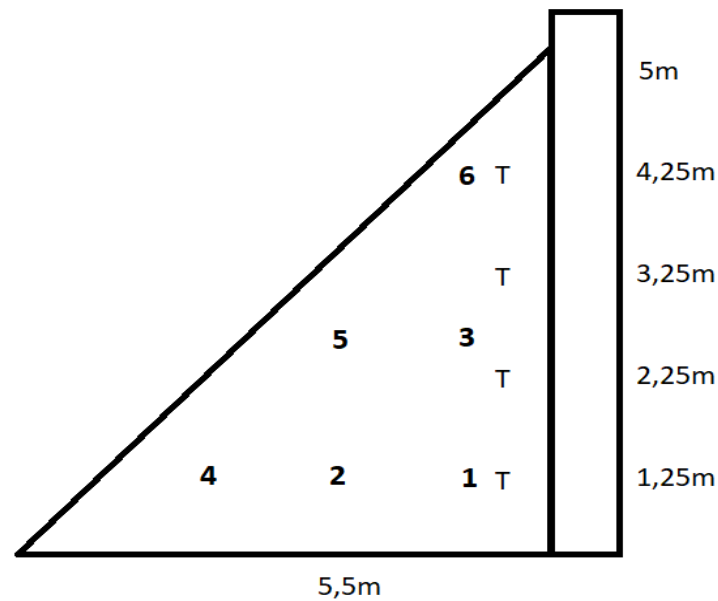
Rökgaskondensering är en teknik för att ta tillvara på energin som finns i det förångade vattnet som bildas då ett fuktigt bränsle förbränns. Det kan även uppstå förångat vatten när naturgas eldas då vätet från naturgasen kan reagera med syre, detta gör att rökgaskondensering förekommer på vissa kraftverk som eldar naturgas. Om kraftverket som ett biobränsle förbränns i har rökgaskondensering påverkar om man ska använda det effektiva värmevärdet eller det kalorimetriska värmevärdet för att beräkna energiproduktionen. Det blir dessutom mer betydande att sträva efter en låg fukthalt vid lagring om rökgaskondensering saknas.

Naturvårdsverket menar att rökgaskondensering är väl utbredd och är standard för nya

anläggningar som eldar fuktiga och/eller väterika bränslen (Naturvårdsverket, 2005). Med detta som bakgrund läggs fokus på kalorimetriskt värmevärde i stackarna i detta arbete.

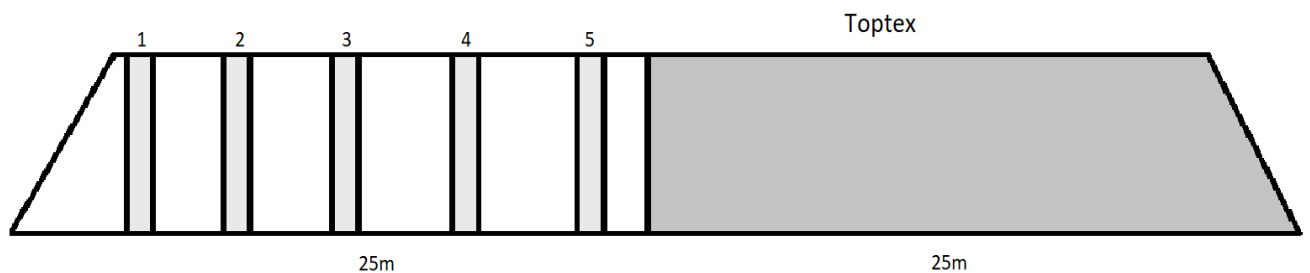
## 2.2 Bakgrund Nykvarn

Materialet i stacken kom från gran och erhöll bränsleklassen P45. Flisen var initialt relativt torr men hade inte legat ute länge efter avverkning det vill säga materialet var färskt. Stacken i Nykvarn var 5m hög, lutad mot en mur, längden 50m där hälften var täckt med Toptex vilket är designat för att kunna släppa igenom vätska underifrån men ej från ovansidan. Figur 1 och figur 2 visar hur stacken såg ut från sidan och framifrån. I denna stack fanns totalt 2 stycken trådlösa enheter för att samla in temperaturdata. En var placerad i den otäckta delen av stacken och den andra i delen som var täckt med Toptex, enligt figur 2. Varje av dessa enheter hade 4 sensorer som låg inne i stacken vertikalt enligt figur 1, markerade med symbolen T. Varje sensor rapporterade in ett temperaturvärde var 15e minut. När dataserierna granskades från dessa sensorer så insågs att de två mellersta sensorerna börjat leverera orimliga värden efter ungefär en månad då bland annat temperaturer lägre än -100 °C förekom. Den övre och undre sensorn verkade vara välfungerande, de slutade dock leverera värden efter drygt halva lagringstiden. De värden som analyserades var därför temperaturer från den övre och nedre sensorn under de första 104 dagarna av lagring, från 9e februari till 24e maj 2017.



Figur 1. Punkter för provtagning och temperaturmätning i stacken.

Insamling av prover skedde från punkterna 1-6 enligt figur 1. 3 prover från varje punkt och mättillfälle fanns att tillgå. Det var kortare mellan provtagning i början av lagringen än i slutet, detta motiveras med att aktiviteten väntas vara högre i början. Insamling av prover gjordes dag 1, 22, 61, 124 och 188. Figur 2 visar stackens långsida och hur prover hämtades från olika snitt. De parametrar som undersöktes och registrerades var fukthalt, askhalt, substansförluster, kalorimetrisk värmevärde, effektivt värmevärde för torrsustans och effektivt värmevärde för råmaterial.

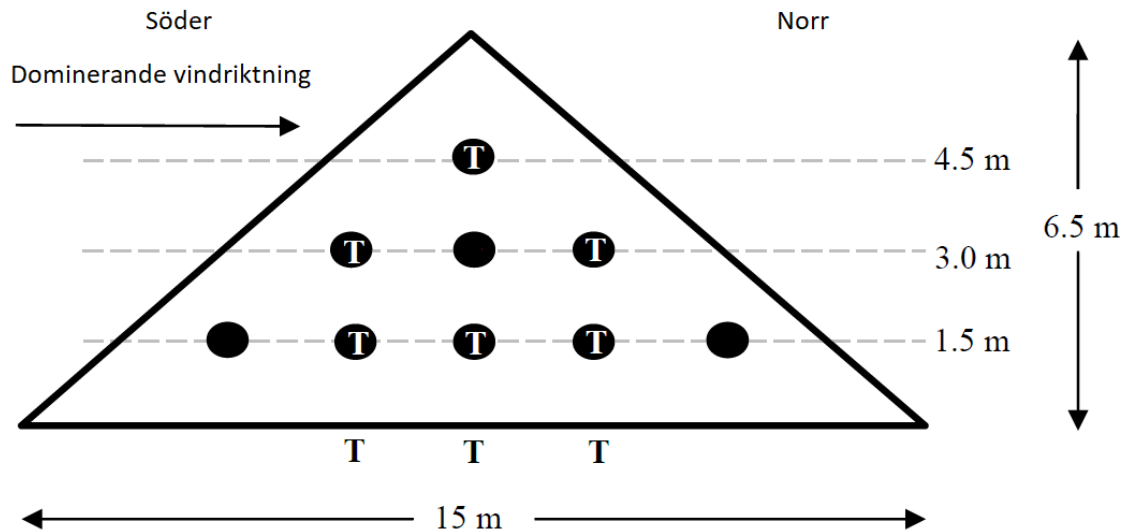


Figur 2. Delen till vänster är otäckt och numreringen visar olika snitt för provtagning.

## 2.3 Bakgrund Vagersta

Materialet som stacken i Vagersta bestod av är GROT som i första hand kom från gran. Avverkningen skedde under 2012 i området runt Skinskatteberg men olika delar har avverkats vid olika tidpunkter (Anerud, et al., 2018). Materialet flisades strax innan lagring i juni 2013 vid terminalen i Vagersta. Efter flisning var bitarnas storlek generellt sätt inom ramen 8-45mm vilket gör att bränslet klassas som ett P45-bränsle enligt europeisk standard för fasta biobränslen som i Nykvarn. Sex stycken Tinytags placerades ut enligt figur 3 i ett snitt både i en otäckt del respektive en täckt del av stacken. Tinytags mätte temperatur och loggade den tillsammans med tidpunkt med ett intervall på 10 minuter. Även här användes Toptex för täckning av halva stacken. Prover togs från 9 punkter enligt figur 3. Detta gjordes innan lagring, efter 3 månader och efter 7 månader. Innan lagringen påbörjades togs 10 prover från varje av dessa positioner. Vid både de senare provtillfällena togs 5 prover från varje position. Proven togs från olika tvärsnitt för att skapa en bild som representerar hela stacken. Dessa prover analyserades i labbmiljö där fukthalt, askhalt, substansförluster och värmevärden undersöktes. Stacken placerades så att långsidorna var riktade mot norr och söder. Den södra sidan utsätts då för mer solstrålning och i detta fall så var även den dominerande vindriktningen från söder till norr.





Figur 3. Stacken i Vägersta (Anerud, et al., 2018), prickarna visar provpunkter och symbolen T innebär att tinytags var placerade där för temperaturmätning.

### 3. Metod

#### 3.1 Nykvarn

För att kunna koppla temperaturförändringar till proverna studerades temperaturförändringar inom samma tidsintervall som provtagningen. Då temperaturmätarna som låg nära punkt 1 och 6 enligt figur 1 var de som fungerade korrekt så blev fokus att studera proverna från dessa punkter. Detta för att se om det finns ett samband mellan hur temperaturerna varit och vilka resultat som proverna visat. Värden på nederbörd från en lokal mätstation intill terminalen gick inte att tillgå. Den data som används är hämtad från SMHI (Sverige meteorologiska och hydrologiska institut), från mätstationen i Gnesta som ligger 20 km från Nykvarn. Tabell 1 visar nederbörden under varje period på 30 dagar från lagringens start till slut. Den visar även genomsnittliga nederbörden de föregående 5 åren under samma perioder. Totalt var nederbörden 214 mm vilket var 52 mm lägre än genomsnittet de tidigare 5 åren.

Tabell 1. *Nederbörd i Gnesta 9e februari till 7e Augusti 2017*

<i>Månad</i>	<i>Nederbörd 2017(mm)</i>	<i>Genomsnittlig nederbörd 2012-2016(mm)</i>
1	44,5	34,7
2	22	26,7
3	26,1	36,2
4	30,8	49,6
5	32,3	66,2
6	58,3	42,6

Då Gnesta ligger 20km från Nykvarn så representerar inte denna nederbörd exakt hur nederbörden var i Nykvarn. Det bör dock på dygnsbasis finnas en stark korrelation vilket gör att trender mellan dygnsnederbörd i Gnesta och temperaturförändringar i stackarna i Nykvarn kan vara relativt pålitliga. Att ha temperaturvärden med 15 minuters upplösning tjänar dock inget syfte varken då jämförelse ska göras med nederbörd eller provresultat. Av denna anledning gjordes temperaturvärdena om till dygnsmedeltemperaturer. Om utetemperaturers korrelation till temperatur i stacken eftersökts hade högre upplösning varit intressant då utetemperaturer varierar, framförallt mellan dag och natt. Detta var dock inte en del i studien.

Närmaste väderstation som rapporterade vindförhållanden var Tullinge som låg 30km bort. Det långa avståndet från Nykvarn gör att en koppling mellan vind i Tullinge och temperaturer i stacken är svår att göra. Vind kan tänkas vara en mer lokal parameter än nederbörd och detta i kombination med en svag koppling från litteraturen gjorde vind mindre intressant än nederbörd för denna stack. Ett mindre fördjupat test där korrelation mellan temperaturer i stacken och vindhastigheter görs därför endast.

Analys av dataserierna gjordes med hjälp av statistiskt stöd genom regressionsanalys samt genom att visuellt studera grafer och dataserier. När en trend identifieras så undersöks om detta kan förklaras utifrån kunskap som anskaffats om processer i stacken.

För att sammanfatta hur dataserierna i Nykvarn behandlades gjordes temperaturdata till dygnsmedelvärden. Dessa jämfördes med dygnsnederbörd från Gnestas väderstation och i viss utsträckning med vindhastigheter från Tullinge. Detta jämfördes i sin tur med förändring av provernas parametrar för att se om de fanns en koppling mellan hur temperaturer och nederbörd varierat mellan olika provintervall och vad som hade hänt med proverna. Då de fungerande temperatursensorerna låg nära punkt 1 och 6 enligt figur 1 så lades fokus framförallt på jämförelse i dessa punkter.

### 3.2 Vagersta

I Vagersta fanns det 6 sensorer i den otäckta delen och 6 stycken i den täckta. Sensorerna som användes kallas för tinytags och de levererade temperaturdata var 15e minut. I Vagersta var fler temperatursensorer fungerande än i Nykvarn, några slutade dock leverera värden efter 3-4 månader. Alla tinytags levererade temperaturdata till minst 98 dagar och som mest 182 dagar. Då provresultat fanns att tillgå från dag 92 så blev temperaturmätningar fram till denna dag speciellt intressant. Då denna stack ej stod mot en mur så var skillnaden mellan södra och norra sidan intressant. Ingen data på vindhastigheter eller solinstrålning användes men vetskap om att den dominerande vindriktningen var söder till norr och att den södra sidan var mer exponerad mot sol gör att detta kan användas för att förklara skillnader mellan långsidorna.

I stackarna i Vagersta fanns 9 provpunkter, vid varje av dessa samlades 5 prover in från olika snitt vid provtillfällena. Provtillfällena var dock endast vid start av lagring, efter 3 månader och efter 7 månader. Provresultat jämfördes med temperaturdata och nederbörd från den lokala väderstationen. Detta analyserades visuellt genom att studera grafer och dataserier men sambandet mellan temperaturdata och nederbörd analyserades även med regressionsanalys.

Tabell 2 visar data över nederbörd vid terminalen i Vagersta. Tabellen beskriver totala nederbörden från varje intervall på 30 dagar under lagringstiden. Rådata som detta baseras på är dock daglig nederbörd från en lokal väderstation.

Tabell 2. *Nederbörd i Vagersta 12e juni till 13e januari 2013*

<i>Månad Nederbörd 2013(mm)</i>	
1	55
2	30,6
3	53,2
4	23
5	62,4
6	29,2
7	55,2

### 3.3 Statistisk metod

För att kunna bekräfta eller avfärda trender som upplevs då data studeras så används en statistisk modell. Detta är speciellt användbart vid långa dataserier där trenderna kan vara svårare att uppfatta. Att använda en statistisk modell blev därför intressant för att undersöka hur nederbörd och vind påverkar temperaturen i stackarna.

Val av modell och vikt av resultat var svårt i detta fall. Syftet med att använda en statistisk modell är att bekräfta eller avfärda samband istället för att ta fram ett exakt resultat på hur variablerna påverkar varandra. Detta då många yttre faktorer påverkar de statistiska sambanden vilket gör värdena svåra att direkt applicera på en annan stack. Då en stack har olika nivåer av fukthalt och lättflyktigt material under sin lagring så skulle även ett samband för hur nederbörd eller vind påverkar temperaturen i en stack under hela lagringsperioden inte säga särskilt mycket. Det var därför viktigt att söka samband under olika perioder snarare än över hela lagringstiden. Intervallen som valdes att undersökas valdes till samma intervall som proverna hämtades för labbtester. Detta för att få ett tydligt resultat som är fokuserat på just dessa tidsintervall där samband kan observeras. Dessa tidsintervall behöver inte skapa de starkaste sambanden mellan temperatur och väderparametrar men det gör att provresultaten kan användas på ett effektivare sätt.

Kortare intervall skapar dock större osäkerhet då färre värden används. Längre intervall skapar ger fler datavärden vilket ökar trendens trovärdighet. Att öka intervallen gör dock som tidigare nämnt att stacken kan vara i olika faser och trenderna beskriver då endast ett genomsnitt av dessa och inte hur trenden har skiftat under tidsintervallet.

Generalized linear model(GLM) valdes som statistisk modell för denna undersökning. GLM tar fram linjära samband mellan en beroende och en eller flera oberoende variabler. I detta fall var temperaturen i stacken den beroende variabeln medan nederbörd och vind var de oberoende. Beräkningarna gjordes i Matlab och med hjälp av den inbyggda funktionen "fitglm" där värdena i tidsserien matas in och man får ut resultat på koefficienter till variablerna, standardavvikelse, signifikansnivå och T-värde. Val som behövde göras var vilken fördelning som används och hur dataseriernas värden skulle presenteras.

Ett antagande som gjordes vid användning av denna modell var att temperaturen är normalfördelad. Det behöver den inte nödvändigtvis vara, temperaturen i stacken kan potentiellt ha olika fördelning beroende på stackens status. En färsk och torr stack bör ha större chans att nå en temperatur på 100 °C över sitt medelvärde än 100 °C under medelvärdet. Detta skulle göra att fördelningen bör vara skjuvad. En stack som har lagrats längre och har hög fukthalt bör inte kunna få samma kraftiga temperaturstegring utan kan röra sig åt båda hållen runt sitt medelvärde. En längre lagrad stacks temperaturberoende kan då tänkas vara närmare normalfördelat. Att använda temperaturvärden från lagringen, göra ett histogram för att välja en fördelning från dessa var ett alternativ, men detta skulle ej vara rättvist. Det skulle vara att påstå att utfallet som skedde beskriver den underliggande fördelningen vilket inte stämmer. Vad som påverkas i första hand med en mindre korrekt fördelning är att signifikansnivån kan ifrågasättas. Valet blev därför att använda normalfördelning men vara medveten om att signifikansnivån inte visar sannolikhet i speciellt hög utsträckning utan mer ett riktmärke för om en trend är svagare eller starkare.

Temperaturen är beroende av flera variabler. Påtagligt är dess beroende av sin tidigare temperaturnivå. Höga temperaturer föregående dagar gör att möjlighet för kemisk oxidation ökar vilket frigör energi, det krävs inte att lika mycket nedbrytning sker för att bibehålla en hög temperatur som för att öka temperaturen till samma nivå. Dessutom kan

ökad fukthalt från nederbörd påverka flera dagar och inte endast samma dag som nederbörd. Detta gör att temperatur dagen innan är bland de bättre sätten att estimeratemperaturen kommande dag. Variabeln *"temperatur dagen innan"* användes dock inte i detta fall då den inte låg i linje med frågeställningen. Variabler som användes var *"nederbörd för en dag sedan"* och *"nederbörd för två dagar sedan"*. Framförallt för de nedre delarna i en stack så kan de potentiellt ta mer än en dag innan nederbörden hinner fukta materialet och ge verkan. Dessutom används dygnsmedelvärden för både temperatur och nederbörd vilket gör att nederbörd sent under ett dygn har svårt att ge ett betydande utslag på medeltemperaturen samma dygn.

Många avvägningar behövde göras som kan påverka vilka trender metoden uppfattar. Ett avvägande var om nederbörd ska räknas i millimeter eller vara en variabel som antingen förekommer eller ej. Man kan tänka sig att 8 mm nederbörd inte har dubbelt så stor inverkan på temperaturen som 4 mm nederbörd, utan att nederbördens påverkan på något sätt bör avta. Båda metoden där mängd nederbörd jämförs med temperatur och där nederbörd ses som ett enum(antingen sant eller falskt). Då nederbörd skulle definieras som sant eller falskt så valdes över 0,5 mm under ett dygn klassats som sant(dvs signifikant nivå av nederbörd har inträffat) och allt under 0,5 mm som falskt. Detta för att fokusera på påverkan av om nederbörd har inträffat snarare än mängden nederbörd.

Problem med vindhastigheter kan till viss del vara att vindriktningar kan vara mer och mindre påverkande, framförallt i Nykvarn då stacken stod mot en mur. Vindriktningar och hastigheter kan även förändras mycket under en dag. Ett annat problem kan vara data på vindhastigheter vilka kan vara mindre trovärdiga om de är ett par mil ifrån stacken då täckande objekt som skog i närområde påverkar. Nederbörd störs inte av närliggande skog vilket gör dess värden mer trovärdiga på dygnsbasis även fast mätstationen även där kan vara några mil ifrån stacken. De var svårt att hitta litteratur kring vindens påverkan på en stack. Luftflöden syresätter stacken vilket kan leda till ökad temperatur men samtidigt leder vinden ut värme vilket leder till att temperaturen minskar. Detta gör att timingen blir viktig då stacken kan vara i behov av att syresättas för att kunna öka sina temperaturer under vissa stadier. Samtidigt som vinden kan leda till lägre temperaturer då värme förs bort i andra stadier. Vind kan därför tänkas vara bidragande till nedbrytning

i större utsträckning än högre temperaturer. Sammantaget kan det vara svårare att hitta trender mellan uppmätta vindhastigheter vid närliggande väderstationer och temperatur i en stack.

## 4. Resultat

### 4.1 Nykvarn

Då förutsättningarna förändras under lagringstiden hade en regressionsanalys över hela perioden inte varit ett bra sätt att beskriva vad som sker under lagringen. Stacken går igenom olika faser där förutsättningarna förändras. Analys sker därför inom ett antal tidsperioder, sedan jämförs och analyseras resultaten. Utgångspunkten var att koppla dessa perioder till tidpunkten då provtagning gjorts för att kunna koppla stackens ingångs- och utgångsparametrar vid varje tidsperiod till temperatur och väderdata.

Stacken i Nykvarn visade starka samband mellan nederbörd, höga temperaturer och substansförluster. Stacken var torr och färsk vilket ger förutsättningar för dessa reaktioner. Den täckta delen av stacken hade lägre substansförluster och lägre fukthalt, den största skillnaden mellan täckt och otäckt del var i den övre delen av stacken.

#### **9e februari-3e mars**

Övre mätpunkten:

Stark positiv korrelation mellan nederbörd, höga temperaturer(*Figur 4*) och substansförluster(*Tabell 3*). Detta kan motiveras med den initialt låga fukthalten och att stacken var färsk vilket innebär att mycket lättflyktigt material finns tillgängligt. Den låga fukthalten hämmar nedbrytningen vilket gör att nederbörd blir en katalysator för kemiska reaktioner och mikrobiell aktivitet. En kraftigt ökande fukthalt visar även att materialet tagit åt sig en stor del av den nederbörden som fallit.

I den övre mätpunkten var temperaturen mellan 45 °C och 70 °C de första 12 dagarna tills tre dagar av kraftig nederbörd sker enligt *figur 4*. I samband med nederbörden observeras dygnsmedeltemperaturer mellan 116 °C och 145 °C för att sedan svalna några dagar innan de tar fart igen(*Figur 4*). Analys med linjär regression ger sambandet 32 °C högre temperatur vid nederbörd samma dag och 26,5 °C högre dagen efter nederbörd, dessa har p-värden på 0,015 och 0,041.



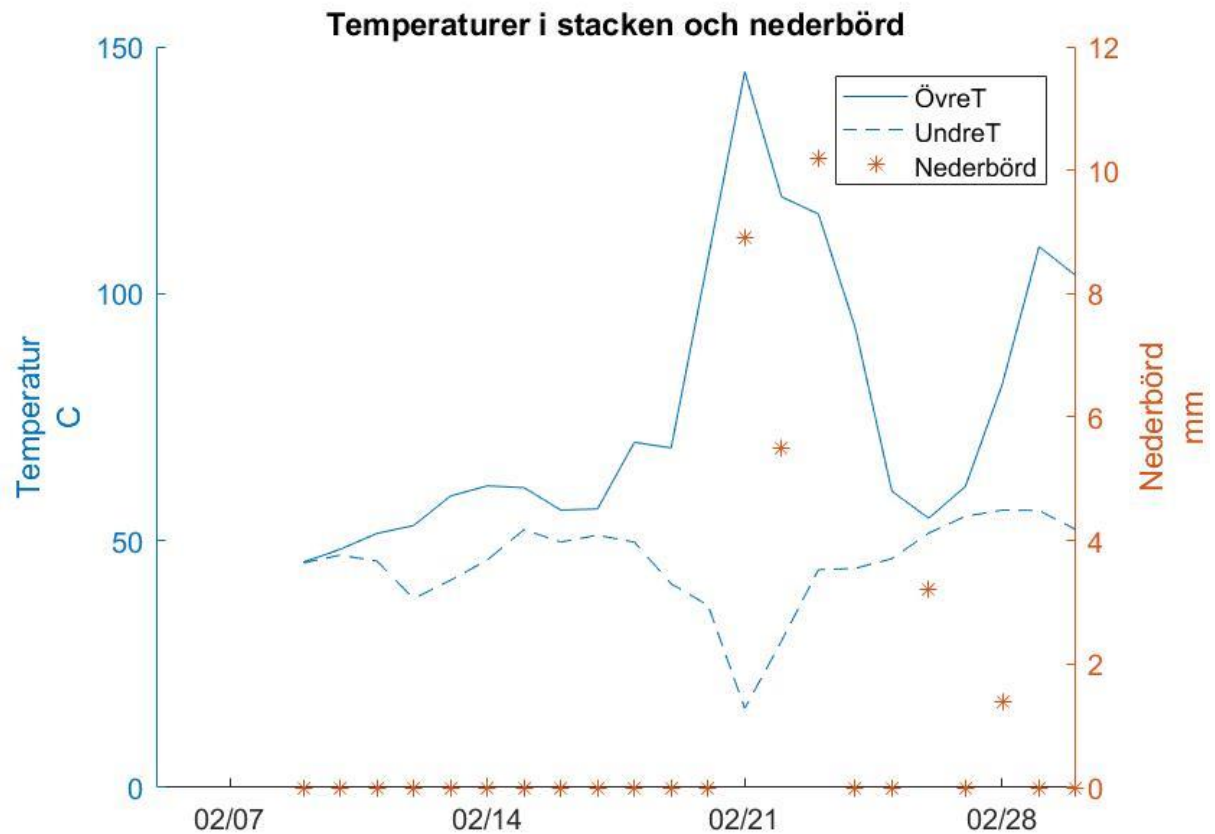
Substansförluster från prover kring den övre mätpunkten var i genomsnitt 5,3%(*tabell 3*) efter denna period(9e februari-3e mars). Fukthalten var i genomsnitt 37,6% då stacken anlades men hade stigit till 42,8% vid slutet av perioden(*tabell 3*).

Nedre mätpunkten:

Starkt negativt samband mellan temperatur och nederbörd samtidigt som nedbrytningen höll sig på en måttlig nivå. Förändringen i fukthalten var låg vilket indikerar att den negativa korrelationen mellan temperatur och nederbörd inte är kopplad till fukthalt. Förklaringen till de låga temperaturerna i samband med nederbörd är därför troligtvis den höga nedbrytningen och de höga temperaturerna i den övre delen av stacken. Den kraftiga nedbrytningen i den övre delen skapar ett stort behov av syre och ett luftflöde från omgivningen. Då kallluft flödar in från omgivningen bland annat genom den nedre delen och sedan upp till den övre delen blir temperaturen låg i den nedre delen. Nedbrytning i den nedre delen sker inte i tillräckligt stor utsträckning för att bibehålla värmebalansen under de dagar då luftflödena till den övre delen är som störst. Resultatet blir en starkt negativ korrelation mellan temperatur och nederbörd i den nedre delen men detta på grund av reaktionen i den övre delen av stacken.

Temperaturerna var 38-52 °C som dygnsmedel tills tre dagar av nederbörd inträffade där temperaturerna var 16-44 °C enligt *figur 4*. Efter detta återhämtade sig temperaturen till omkring 50 °C(*Figur 4*). Linjär regression ger sambandet -9,2 °C samma dag som nederbörd med p-värdet 0,067.

Genomsnittliga substansförluster vid den nedre mätpunkten var 2%. Fukthalten hade som ingångsvärde 35,6% och hade stigit till 36,3% efter denna period.



Figur 4. Temperaturer i stacken och nederbörd från 9e april till 3e mars.

### 3e mars-22 mars

Övre mätpunkten:

Det var en övergångsperiod från höga temperaturer till lägre. Här fanns ingen koppling mellan temperatur och nederbörd under perioden. I *figur 5* kan man urskilja att en övergång sker från att nederbörd har en positiv inverkan på temperaturen till att nederbörd ger en negativ inverkan. Det kan vara så att denna del av stacken redan är mättad på fukt vilket gör att nederbörden i större utsträckning ger en avkylande effekt.

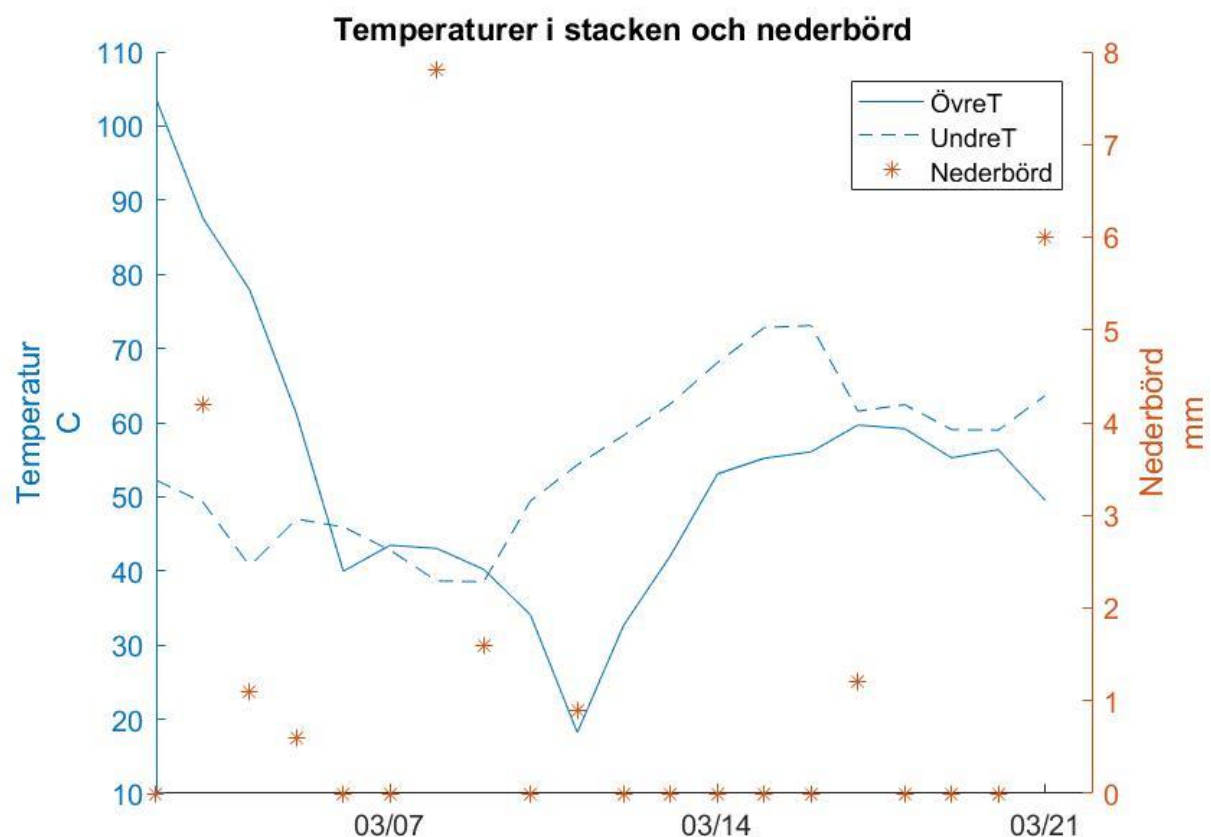
Under denna period kommer temperaturen ner till mer normala nivåer med ett genomsnitt på 53,4 °C enligt *figur 5*. Det finns ingen koppling mellan temperatur och nederbörd enligt regressionsanalysen.

Nedre mätpunkten:

Regressionsanalysen visar fortfarande en negativ korrelation mellan nederbörd och temperatur vid den nedre mätpunkten. Man kan dock se ett skifte i *figur 5* där temperaturerna blir högre i den nedre delen än i den övre även i samband med nederbörd.

Det var en medeltemperatur på 55,0 °C med några dagar av temperaturer runt 70 °C (*Figur 5*).

Regressionsanalyser ger en negativ korrelation mellan nederbörd och temperatur både samma dag, dagen efter och två dagar efter nederbörd. Dessa med k-värden [-11,3; -8,2; -7,9] och p-värdena [0,011; 0,045; 0,059].



Figur 5. Temperaturer i stacken och nederbörd från 3e mars till 22a mars.

## 23e mars- 11e april

### Övre mätpunkten:

Under denna period hade nederbörd endast en nedkylande effekt på den övre delen av stacken. Statistiska analysen visar detta men förändringen kan även ses visuellt i *figur 6*. Nedbrytningen var lägre under denna period vilket tyder på att det mesta lättflyktiga materialet redan var förbrukat då fukt inte var hämmande under perioden.

Regressionsanalysen samband mellan temperatur och nederbörd samma dag, dagen efter och två dagar efter var  $[-4,9; -5,5; -8,8]$  med p-värden  $[0,05; 0,04; 0,0004]$ .

Genomsnittliga substansförlusterna för den övre mätpunkten var 8,2% och fukthalten var 41,1% här enligt *tabell 3*.

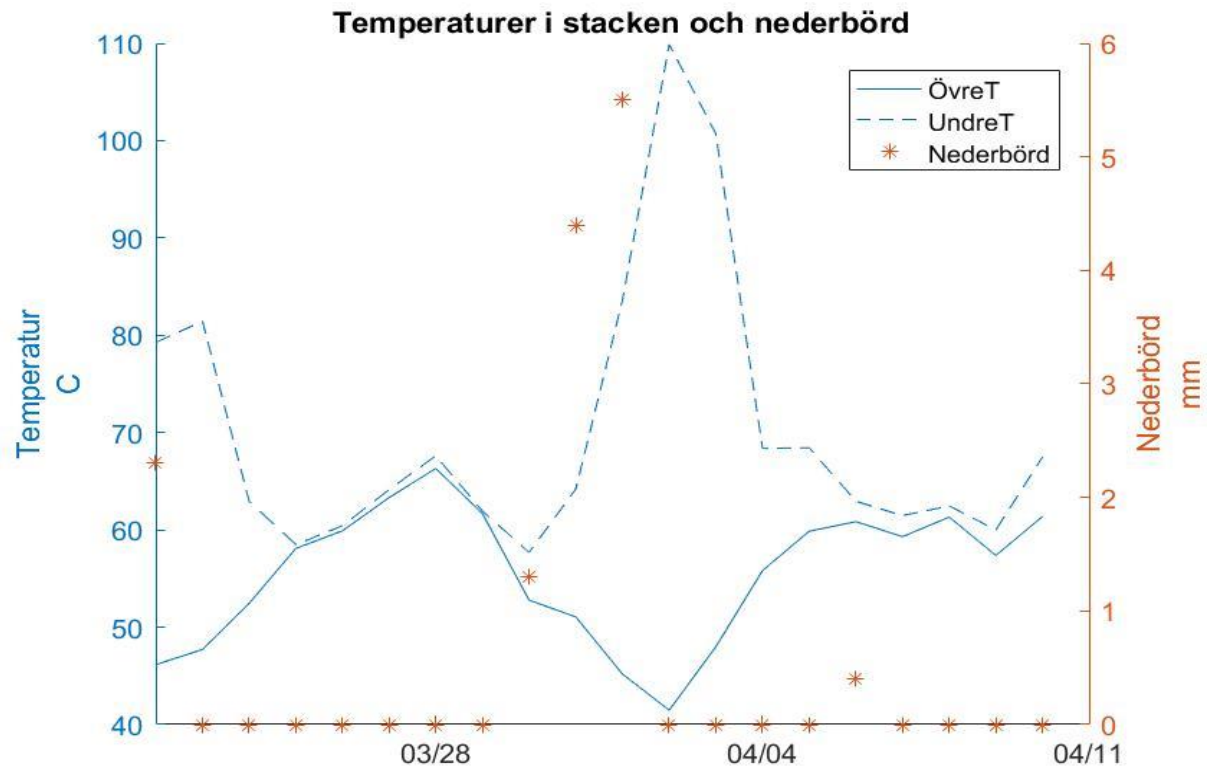
### Nedre mätpunkten:

Under denna period var sambandet mellan temperatur och nederbörd starkt positivt dagen efter och två dagar efter nederbörd (*Figur 6*).

Att de tar en dag för temperaturen att öka kan motiveras med att den nedre punkten är flera meter ner i stacken och det tar tid för vattnet att sippra igenom. En ökad fukthalt under perioden visar även att fukten har nått den nedre delen. Nedbrytningstakten var även högre under denna period trots att mindre lättflyktigt material fanns tillgängligt än tidigare under lagringsperioden vilket även är ett tecken på nederbördens påverkan på den nedre delen.

Regressionsanalysen visar att kopplingen mellan höga temperaturer dagen efter och två dagar efter nederbörd är stark. Koefficienter för sambandet mellan temperatur dagen efter nederbörd samt två dagar efter var  $[14,3; 16,7]$  med p-värden  $[0,064; 0,011]$ .

Substansförlusterna efter denna period var i genomsnitt 2,9%. Fukthalten var 37,9% i genomsnitt vilket visar att fukten nått den nedre delen här enligt *tabell 3*.



Figur 6. Temperaturer i stacken och nederbörd från 23e mars till 11e april.

### 12e april-24e maj

Övre mätpunkten:

Under denna period gav nederbörd en fortsatt nedkylande effekt på den övre delen av stacken. Det var låg nedbrytningstakt och låga temperaturer framförallt i samband med nederbörd.

Under denna period var temperaturerna oftast minskande i samband med nederbörd med en medeltemperatur på 59,8 °C. Regressionsanalysen ger [-7,2; -5,1] som koefficienter för temperatur samma dag som nederbörd och dagen efter. Detta med p-värden [0,001; 0,012] vilket tydligt indikerar att nederbörd gav en avkylande effekt kring den övre mätpunkten.

Substansförlusterna mättes den 13e juni och var i genomsnitt 8,9%, de verkar ha avstannat rejält. Fukthalten var i genomsnitt 39,7%.

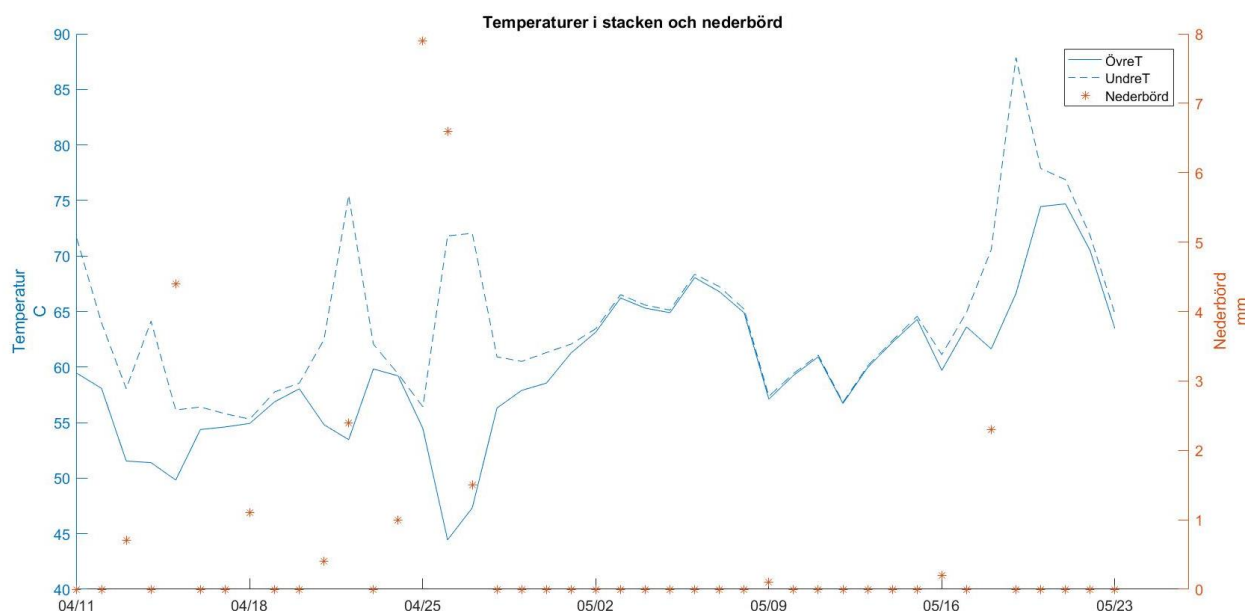
Nedre mätpunkten:

Under denna period var statistiska analysen mindre övertygad om ett positivt samband mellan temperatur och nederbörd. Det fanns dock ett samband beroende på tolkning av nederbörd. Genom att studera *figur 7* kan man dock se sambandet grafiskt.

Detta var enda perioden där regressionsanalys med nederbörd som kategori gav ett annat resultat än analys med variabeln mängd nederbörd. Ingen trend fanns med nederbörd som kategori, när man använde mängd nederbörd istället så fanns dock trenden 1,3 C/ml dagen efter nederbörd med ett p-värde på 0,08 vilket innebär att trenden är svag.

Medeltemperaturen under denna period var 64,2 °C.

Mätningarna av substansförluster den 13e juni gav ett genomsnitt på 4,3% vilket visar att nedbrytningstakten avtagit även i de nedre delarna av stacken men är betydligt högre än i den övre mätpunkten. Fukthalten sjönk till 36,9%.



Figur 7. Temperaturer i stacken och nederbörd från 12e april till 24e maj.

13 juni-16e augusti

Ingen temperaturmätning finns mellan dessa datum, men mätningar på fukthalter och substansförluster är gjorda. Takten på nedbrytning har avtagit i både den övre och nedre mätpunkten, även lägre fukthalter.

I den övre mätpunkten var substansförlusterna i genomsnitt 11,3% efter denna period och i den nedre mätpunkten 6%. Fukthalterna var 36,6% i den övre mätpunkten och 36,5% i den nedre. De låga fukthalterna kan bero på årstiden.

### **Vindens påverkan**

Inga tydliga trender uppfattades med regressionsanalys under dessa intervaller. Här användes medelvindhastighet på dagsbasis, dock utan hänsyn till vindriktning.

### **Jämförelse mellan täckt och otäckt stack**

Substansförlusterna i den täckta delen av stacken var betydligt lägre än i den otäckta delen, framförallt vid den övre mätpunkten (*tabell 3 och 4*). Fukthalten var lägre i den täckta delen, även där var skillnaden som störst vid den övre mätpunkten (*tabell 3 och 4*). Den periodvis starka kopplingen mellan nederbörd, värmeutveckling och substansförluster i den otäckta delen stärks ytterligare av att substansförlusterna var betydligt lägre i den täckta delen under motsvarande perioder. I genomsnitt över hela stacken så minskade energiförlusterna från 8% till 5% när stacken täcktes. Att skydda stacken innebar betydligt lägre energiförluster vilket ger en positiv inverkan på både ekonomi och klimat.

Tabell 3. *Sammanställning av substansförluster och fukthalter i otäckt stack.*

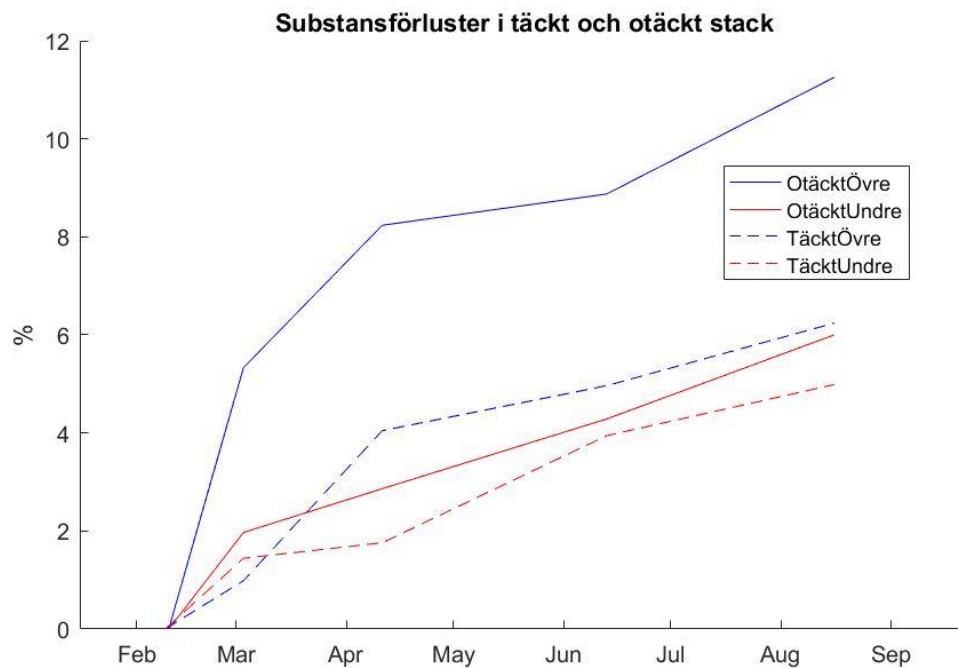
	Substansförluster nedre mätpunkten	Substansförluster övre mätpunkten	Fukthalt nedre mätpunkten	Fukthalt övre mätpunkten
2017-02-09	0	0	35,6%	37,6%
2017-03-03	2,0%	5,3%	36,3%	42,8%
2017-04-11	2,9%	8,2%	37,9%	41,1%
2017-06-13	4,3%	8,9%	36,9%	39,7%
2017-08-16	6,0%	11,3%	36,5%	36,6%

Tabell 4. *Sammanställning av substansförluster och fukthalter i täckt stack.*

	Substansförluster nedre mätpunkten	Substansförluster övre mätpunkten	Fukthalt nedre mätpunkten	Fukthalt övre mätpunkten
2017-02-09	0	0	36,9%	34,7%
2017-03-03	1,4%	1,0%	37,5%	36,4%
2017-04-11	1,8%	4,0%	35,1%	32,7%
2017-06-13	3,9%	5,0%	34,6%	34,8%
2017-08-16	5,0%	6,2%	35,4%	33,6%



Den stora skillnaden i substansförluster var under de första månaderna och i den övre mätpunkten vilket ses i *figur 8*.



Figur 8. Substansförluster i täckt och otäckt stack i Nykvarn

#### Värmevärden, askhalt och energiinnehåll

Det finns logiska mönster som uppstår vid lagring i både Nykvarn och Vagersta. Då lättflyktigt bränsle med lågt energiinnehåll bryts ner i första hand så ökar värmevärdet. Det finare bränslet med högre energiinnehåll bevaras i större utsträckning. Då den icke organiska delen ej bryts ner så ökar askhalten i takt med att substansförluster sker. Inte för att mer icke organiskt material tillförs till stacken utan för att stackens totala vikt minskar. Sammanfattningsvis så blir askhalten och värmevärdet högre under lagring då substansförluster sker.

Kopplingen är inte gjord direkt från nederbörd till askhalt eller värmevärden men i och med de ovan nämnda sambandet så finns det ett samband. När nederbörd ger högre substansförluster så blir askhalt och värmevärde också högre. Viktigt att påpeka är dock att vinsten genom ett ökat värmevärde är litet jämfört med förlusten av bränsle.

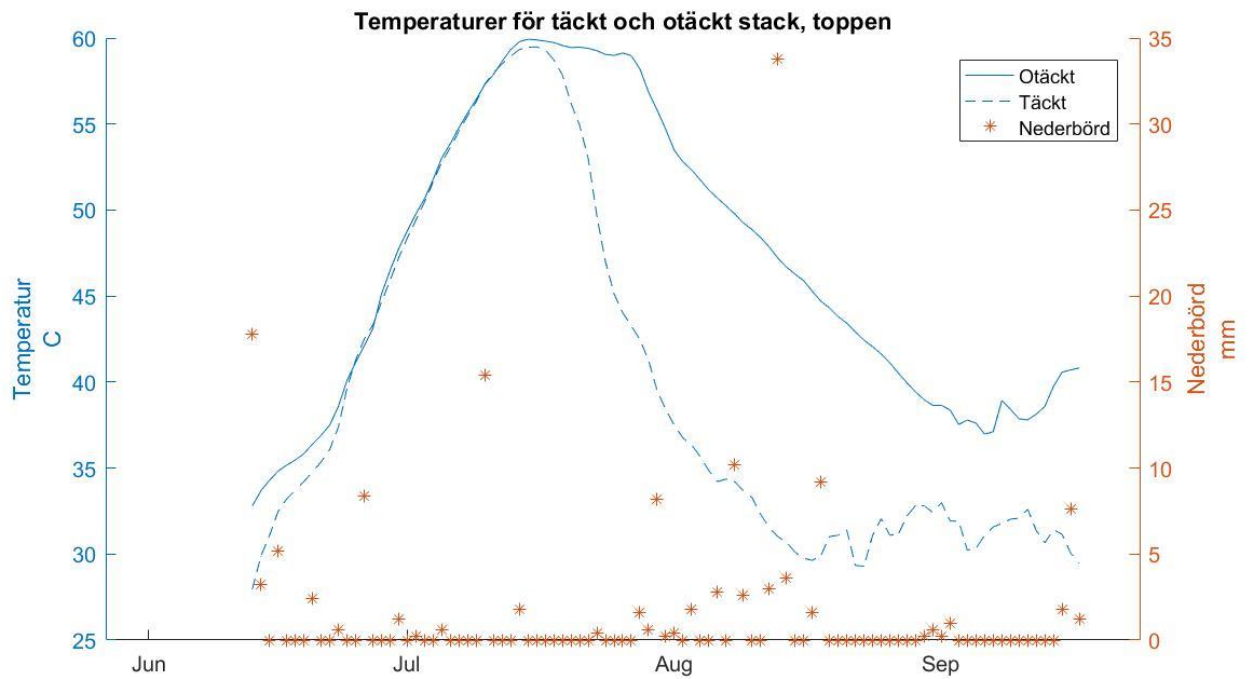
Energiinnehållet blir ett bra sätt att gestalta den sammanvägda påverkan på stacken från substansförluster och förändring i värmevärde.

I den otäckta delen ökade de genomsnittliga kalorimetriska värmevärdet från 21,1 MJ/kg till 21,6 MJ/kg under lagring. Genomsnittliga substansförlusterna för hela stacken var 9,9%. Minskad vikt men ökat värmevärde gjorde att de genomsnittliga energiförlusterna från alla mätpunkterna under hela lagringstiden blev 8,0%. Genomsnittliga askhalten steg från 3,6% till 5,0%.

I den täckta delen ökade värmevärdet från 21,07 MJ/kg till 21,32 MJ/kg vilket är en ökning på 1,0%. Genomsnittliga substansförlusterna efter hela lagringstiden var 6,0%, det gör att energiförlusterna blev 5,0% med tanke på det ökade värmevärdet. Askhalten ökade från 3,8% till 5,0%.

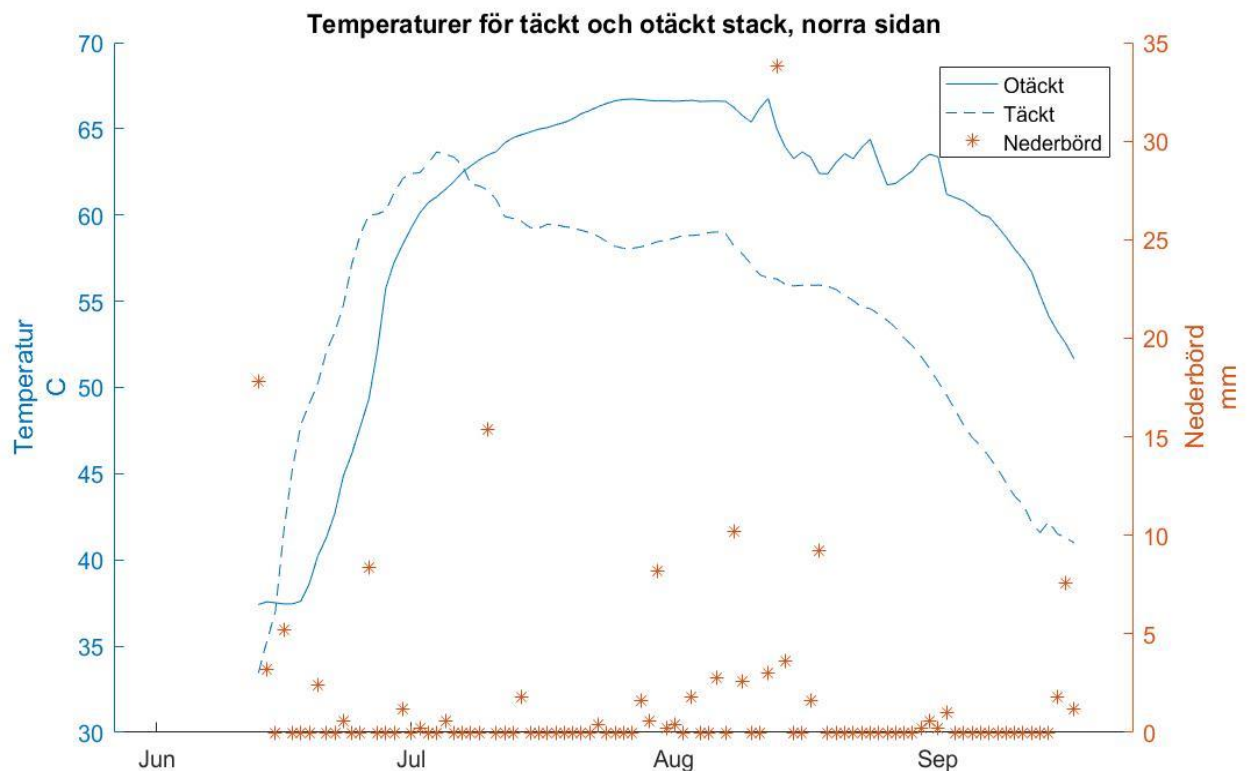
#### 4.2 Vagersta

I den översta delen av stacken påverkades initialt temperaturutvecklingen av nederbörd vilket kan ses i figur 9. Detta beror troligtvis att fukthalt ej var en begränsande faktor för nedbrytning då den initiala fukthalten var hög. Att den täckta stacken ej återfuktats verkar dock göra att temperaturer faller snabbare och till lägre nivåer efter en dryg månad. Sambandet mellan nederbörd och temperatur kan inte styrkas av den statistiska metoden då inga drastiska temperaturförändringar sker i samband med nederbörd. Dock om man ser på hela intervallet i figur 9 kan påverkan från nederbörd ses tydligt.



Figur 9. Temperaturer i täckt och otäckt stack, översta segmentet.

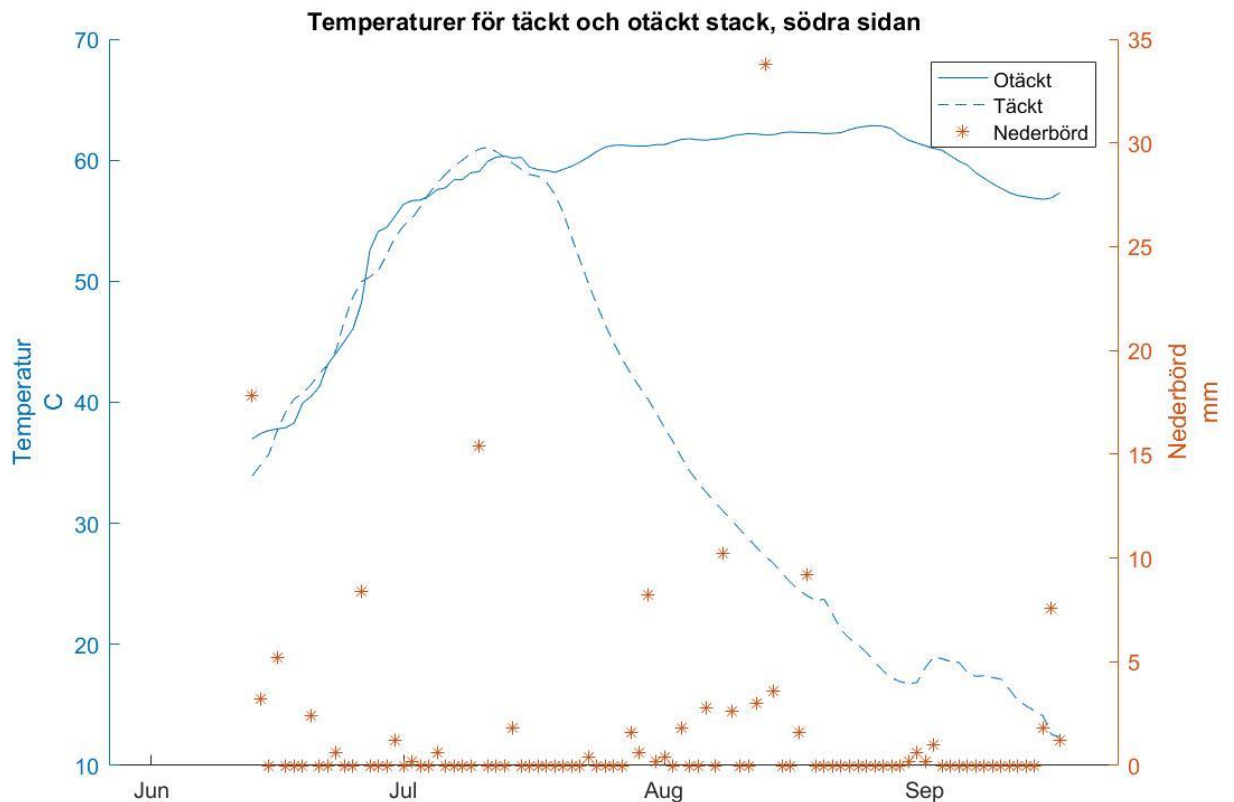
På den norra sidan uppstår samma fenomen som vid toppen där den otäckta delen bibehåller högre temperatur trots en initialt liknande uppgång enligt figur 10. Precis som vid toppen kan inte sambandet styrkas statistiskt då inga drastiska temperaturförändringar sker i samband med nederbörd men påverkan från återfuktning är tydlig om man ser på hela intervallet.



Figur 10. Temperaturer i täckt och otäckt stack, mittensegmentet, norra sidan.

På den södra sidan var skillnaden mellan täckt och otäckt del som störst temperaturmässigt enligt figur 11. Samma trend som tidigare där temperaturerna initialt följer varandra men delen som blivit återfuktad tappar inte temperatur i samma utsträckning. Att skillnaden mellan täckt och otäckt del är som störst här kan bero på att denna sida var exponerad mot vind i störst utsträckning.

Ett område med hög nedbrytningstakt kan gynnas av vinden som syresätter stacken men i ett område med lägre nedbrytningstakt så kan vindens avledande av värme påverka mer.



Figur 11. Temperaturer i täckt och otäckt stack, mittensegmentet, södra sidan.

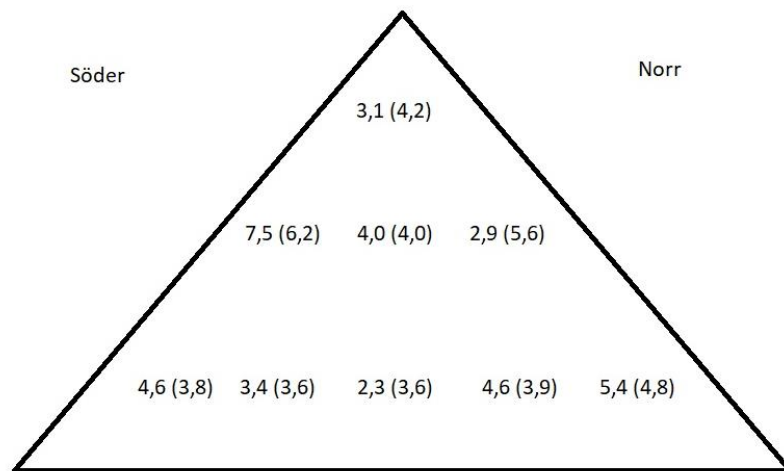
#### Regressionsanalys:

De första 60 dagarna finns en trend där nederbörd ger en nerkylande effekt samma dag, dagen efter och två dagar efter nederbörd. Det är svårt att visuellt se denna trend, temperaturförändringarna är även långsamma och små jämfört med i Nykvarn. Inga tydliga temperaturfall förekommer i samband med nederbörd. Regressionsanalysen identifierar även liknande storlek på nedkylande effekt från nederbörd på den täckta stacken under de första 60 dagarna. Detta gör att sambandets trovärdighet bör ifrågasättas. Det finns inga trender dag 60 till 120 med p-värden under 0,1 från regressionsanalysen för vare sig den täckta eller den otäckta stacken.

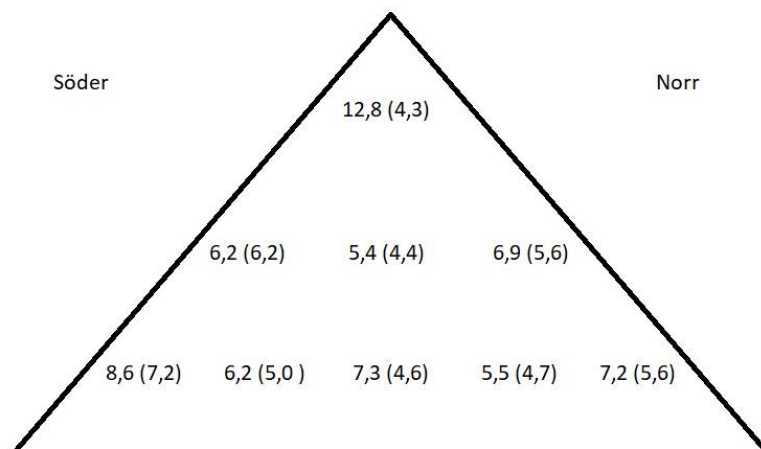
Efter den initiala temperaturuppgången där den täckta och otäckta stacken i stort sett

följer varandra kan man se att temperaturen avtar betydligt mer i den täckta stacken. Detta gäller både på den norra sidan, södra sidan och på toppen.

Figurer nedan visar procentuella substansförluster vid olika delar av stacken där värden för den täckta delen står inom parentes. *Figur 12* visar värden från mätningen den 12e september 2013, halvvägs in i lagringen. *Figur 13* visar substansförluster från den 13e januari 2013, i slutet av lagringstiden.



Figur 12. Procentuella substansförluster för otäckt och täckt(inom parentes) del efter 3 månaders lagring (Anerud, et al., 2018).



Figur 13. Procentuella substansförluster för otäckt och täckt(inom parentes) del efter 6 månaders lagring (Anerud, et al., 2018).

Tabell 5. *Genomsnittliga substansförluster och fukthalter för övre och nedre mätpunkter i otäckt stack.*

	Substansförluster nedre mätpunkter	Substansförluster övre mätpunkter	Fukthalt nedre mätpunkter	Fukthalt övre mätpunkter
2013-06-12	0	0	51,3%	49,9%
2013-09-12	4,1%	4,4%	48,7%	47,1%
2014-01-13	6,9%	7,8%	47,5%	48,7%

Tabell 6. *Substansförluster och fukthalt för täckt stack.*

	Substansförluster nedre mätpunkter	Substansförluster övre mätpunkter	Fukthalt nedre mätpunkter	Fukthalt övre mätpunkter
2013-06-12	0	0	51,5%	49,1%
2013-09-12	3,9%	4,9%	49,6%	46,1%
2014-01-13	5,4%	5,2%	48,7%	41,2%

Under de första tre månaderna är substansförlusterna snarlika för både den täckta och otäckta stacken, aningen högre i de övre mätpunkterna. Den stora skillnaden är efter sex månader då substansförlusterna är betydligt högre i den otäckta stacken. Den initialt höga fukthalten i stacken förklarar detta, då fukthalten sjunker över tiden i den täckta stacken så minskar nedbrytningstakten. Då den otäckta stacken återfuktas minskar inte takten på nedbrytning i samma utsträckning. Skillnaderna mellan både substansförluster och fukthalter i täckt jämfört med otäckt stack är som störst i de övre delarna.

### Värmevärden, askhalt och energiinnehåll

Det kalorimetriska värmevärdet gick från 20,65 MJ/kg till 20,82 MJ/kg under lagringen i den otäckta delen av stacken, en ökning med 0,8%. De genomsnittliga substansförlusterna var 7,3% vilket gör att energiförlusterna blev 6,6%. Askhalten var i genomsnitt 2,9% innan lagringen börjat men ökade till 3,6% under lagringstiden.

I den täckta delen var det genomsnittliga värmevärdet innan lagring 20,74 MJ/kg. Efter lagringstiden hade det stigit till 21,13 MJ/kg. De genomsnittliga substansförlusterna var 5,3% och de totala energiförlusterna blev 3,5%. Askhalten gick från 3,1% i början av lagringstiden till 3,7% i slutet.



## 5. Diskussion

Stacken i Nykvarn visade starka reaktioner vid första nederbörden, den övre temperaturmätaren nådde då sina högsta temperaturer medan den undre hade sina lägsta temperaturer. Då stacken var både relativt torr och färsk kan man tänka sig att nederbörd kan ha blivit en katalysator för reaktioner. Temperaturen var omkring 50-60 °C innan den första nederbörden, drivande krafter för nedbrytning var då troligtvis svamp och cellandning. Efter denna nederbörd, när temperaturerna steg till över 100 °C i den övre mätpunkten i flera dagar, bör kemisk oxidation varit orsaken till denna intensiva nedbrytning. Vid den övre mätpunkten var även substansförlusterna utmärkande höga efter de första tre veckorna, 5,2% på endast 22 dagar är en extrem nivå. Fukthalten hade stigit med 5,2 procentenheter och regressionsanalysen visade tydligt att temperaturstegringen skedde i samband med nederbörd. Sammantaget gör detta att allt tyder på att nederbörden var orsaken till den höga temperaturen och nedbrytningen i den övre mätpunkten.

Vad som hände i den nedre mätpunkten var inte lika klart. Där var temperaturen som lägst efter den första nederbörden. Regressionsanalysen visar ett tydligt samband mellan nederbörd och låga temperaturer i den nedre mätpunkten. Fukthalten steg endast 0,7 procentenheter från en låg nivå vilket visar att nederbörden knappt nått den nedre mätpunkten. Då substansförlusterna var 2% efter tre veckor vilket var den högsta nedbrytningstakten för denna mätpunkt så verkar inte de låga temperaturerna bero på låg nedbrytning och som konstaterat innan så beror detta inte på nederbörden. Substansförlusterna i den nedre mätpunkten var även högre än i den täckta delen vilket innebär att nederbörd inte bör ha påverkat nedbrytningen negativt.

Den logiska förklaringen till de låga temperaturerna i den nedre delen i samband med nederbörd är luftflöden. Kraftiga luftflöden kan göra att värme som uppkommer vid nedbrytning försvinner i högre takt än vad värme tillkommer vilket gör att temperaturen i stacken närmar sig utomhustemperatur. Höga luftflöden kring den nedre mätpunkten kan förklaras med de höga temperaturerna i den övre delen av stacken där nedbrytningen var hög och behovet av syretillförsel stor. Då värmen i den övre delen av stacken stiger får

inte den nedre delen av stacken ta del av värmen som uppstår i den övre delen. Starka luftströmmar från sidorna och underifrån behövdes för att tillfredsställa syrebehovet i den övre delen. Detta förklarar att den nedre mätpunkten påvisade de låga temperaturerna i samband med nederbörd trots att ingen betydande ökning av fukthalt påvisades.

Under de nästkommande 39 dagarna (3e mars-11april) skede en övergång till en ny fas i stacken. Den övre delen visade initialt fortsatt höga temperaturer i samband med nederbörd för att sedan inte påverkas eller visa minskande temperaturer efter nederbörd. Nedbrytningstakten minskade men var fortfarande högre än i senare perioder. Nedbrytningen var relativt hög under denna period men då temperaturen sjönk under perioden kan man tänka sig att även nedbrytningen var som störst initialt för att sedan minska. Det sker ingen större förändring i fukthalt. Inga trender uppfattades med regressionsanalysen då den övre delen reagerade olika på nederbörd under denna period. I den nedre delen skede även en förändring under denna period där den till en början visade svagt negativa samband mellan nederbörd och temperatur för att sedan gå in i en ny fas.

I slutet av perioden visade regressionsanalysen ett starkt samband mellan nederbörd och temperaturökning dagen efter samt två dagar efter i den nedre punkten. Fukthalten har även fått en betydande ökning på 1,6 procentenhet under denna period. Detta visar att den övre delen blivit mer mättad på vätska och kan låta vattnet sippra igenom till de nedre delarna. I den nedre delen uppmättes en dagsmedeltemperatur på över 100 °C dagen efter två dagars nederbörd vid ett tillfälle. Över denna period höll substansförlusterna trots detta en lägre takt än i den första perioden men högre än de följande.

Under de sista 42 dagarna (12e april-24e maj) där temperaturmätningen var fungerande var trenderna svaga. I den övre delen var substansförlusterna låga och även temperaturerna. Fukthalten sjönk en aning under denna period. Inga trender kring nederbördens påverkan på temperaturen uppfattades genom regressionsanalysen. I den nedre mätpunkten var substansförlusterna och temperaturerna högre, en svag trend kunde uppfattas där nederbörd innebar högre temperaturer dagen efter. Grafiskt kan man se att temperaturerna i den övre och nedre mätpunkten följer varandra den största

delen av tiden men vid flera tillfällen i samband med nederbörd så ökar temperaturen i den nedre mätpunkten och minskar i den övre mätpunkten.

Under de sista två månaderna av lagringstiden var inte temperaturmätarna fungerande, men troligtvis var inte temperaturerna speciellt dramatiska då substansförlusterna var låga. I den övre delen var substansförlusterna 1,2 procentenheter per månad. Då man inte kan använda samma prov flera gånger bör man ha i åtanke att provet som analyseras inte haft exakt samma ingångsvärden inför en period som de proven man använt för att analysera tidigare period. Även om proven är placerade vid motsvarande punkter och ska ha liknande ingångsvärden i början av lagringstiden så kan det skilja hur utvecklingen skett.

Fukthalten hade sjunkit under sista perioden vilket kan bero på att detta var sommarmånaderna vilket kan ha hjälpt till att torka stacken. I de nedre delarna var även nedbrytningen relativt låg med 0,65 procentenheter per månad och med aningen sänkt fukthalt.

Sammantaget så gav nederbörden en stor påverkan, i form av höga substansförluster och höga temperaturer i samband med nederbörd, i början av lagringstiden då stacken var torr och färsk. Det var dock endast den övre delen som fick ta del av detta vilket gjorde att den nedre delen började reagera på nederbörd när den övre delen var mättad. Stora temperaturspikar i den nedre delen kom först efter 50 dagar, nästkommande prov observerades betydande förhöjda fukthalter i den nedre delen för första gången.

När täckt och otäckt stack jämförs så kan man se att den stora skillnaden var mellan de övre delarna där substansförlusterna var 5 procentenheter högre i den otäckta delen. Fukthalter var betydligt lägre i den täckta delen vilket bör vara den huvudsakliga orsaken. I den nedre punkten skiljer det endast en procentenhet mellan substansförlusterna men det är fortfarande den otäckta delen som har högre förluster. Här är skillnaden i fukthalt inte lika märkbar.

Då lättflyktigt material inte är det energirikaste så ger höga substansförluster högre värmevärden. För att få en rättvis bild av vad som gått förlorat bör därför energiinnehåll

användas där substansförluster och värmevärde kombineras. Sammantaget blev energiförlusterna för hela den otäckta stacken 8% medan energiförlusterna i den täckta var 5%. För att utvärdera värdet av att täcka stackarna med Toptex bör en ekonomisk kalkyl göras på detta där kostnad för arbete och material jämförs med energiförlusterna. Dock bör inte detta utvärderas endast utifrån ekonomi utan resurshushållning och miljöperspektiv talar för att ta tillvara på bränslet så bra som möjligt. En möjlighet till att få ut mer energi från samma bränsle är ett steg mot ett mer hållbart samhälle.

I Vagersta var temperaturförändringarna inte lika dramatiska som i Nykvarn. Detta material var mindre färskt vilket innebär att det inte finns lika mycket tillgängligt lättflyktigt material. Dessutom var fukthalten betydligt högre från början vilket gör att nederbörd inte får samma stora initiala påverkan. Regressionsanalysen gav en svag trend under första perioden där nederbörd gav en avkylande effekt på stacken. Samma trend fanns i den täckta delen vilket gör att man kan ifrågasätta denna trend, den var dessutom svårt att observera denna trend utifrån graferna. En förklaring till trenden från regressionsanalysen är att det kom en del nederbörd när stacken nyligen blivit utplacerad och den inte hade hunnit bygga upp en grundtemperatur från mikrobiell aktivitet. Dessutom kom det en del nederbörd när temperaturerna redan hade fallit i de flesta delarna av stacken, efter ungefär två månader. Det gör att regressionsmodellen observerar lägre temperaturer i samband med nederbörd än när nederbörden inte infann sig trots att nederbörden inte ser ut att ha varit orsaken till detta. Temperaturerna nådde inte över 70 °C som dagsmedelvärden och temperaturförändringarna var jämna och långsamma i jämförelse med stacken i Nykvarn. Efter tre månaders lagring var substansförlusterna liknande i både den täckta och den otäckta delen. Aningen högre i de övre än i de nedre delarna. Både de övre och de nedre mätpunkterna hade fukthalter på över 46% vilket gör att tillgång på fukt inte bör vara ett problem varken för de täckta delarna eller nedre delarna i stacken.

I alla Vagerstas temperaturgrafer kan man under den första månaden se liknande trend, stigande temperatur som når sin topp på omkring 60 °C. Sedan faller temperaturerna i de täckta delarna jämfört med de otäckta. Det ser ut som att återfuktning från nederbörd har en påverkan på längre sikt snarare än initialt. Proverna efter 3 månaders lagring visar inga större skillnader mellan den täckta och den otäckta delen. Det var högre

substansförluster i de övre delarna för både täckt och otäckt stack efter 3 månader. Efter 7 månader är skillnaden dock tydlig där substansförlusterna är högre i den otäckta delen. Den största skillnaden är på toppen. Genomsnittliga fukthalter för de övre mätpunkterna i den täckta delen är 41,2% jämfört med 48,7% i den otäckta delen. Att substansförlusterna är betydligt lägre i den täckta delen under de sista 3 månaderna indikerar att fukthalter närmare 50% är mer gynnsamt för nedbrytning än fukthalter omkring 40% för detta material.

Den södra sidan var i större utsträckning exponerad mot vind, sol och till viss utsträckning nederbörd då vindriktningen generellt sett var sydlig. Det var därför intressant att jämföra de olika sidorna av stacken i Vagersta. Graferna med temperatur visar snarlika resultat för den otäckta delen där båda sidorna har temperaturer omkring 60 °C den största delen av tiden. Större skillnader kan man se på den täckta delen där temperaturerna på den södra delen sjunker betydligt snabbare, ända ner till runt 15 °C i slutet av september, medan den norra sidan håller sig över 40 °C. Substansförlusterna för den täckta delen är dock aningen högre i den södra delen vilket gör att temperaturerna inte speglar substansförlusterna. Detta kan bero på att luftgenomströmningen är högre på den södra sidan vilket hämmar temperaturer men verkar inte ha någon negativ effekt på substansförluster utan potentiellt bidra till ökade substansförluster. I den otäckta delen var substansförlusterna betydligt högre efter 3 månader vid den södra än vid den norra. Detta trots att temperaturerna var snarlika, även i detta fall kan de ökade luftflödena i den södra delen hållit nere temperaturerna men inte substansförlusterna.

Proverna efter 7 månader stämmer dock inte helt överens med denna bild. I den otäckta delen är substansförlusterna lägre på den södra sidan än vid tidigare mätning och klart högre på den norra sidan. Detta visar hur det kan skilja sig mellan olika prover och att för att få en mer korrekt bild behövs fler prover. Kallare utetemperaturer mellan första och andra provet kan ha en viss påverkan. Höga luftflöden vid låga utetemperaturer bör vara mindre gynnsamt än vid högre temperaturer. I den täckta delen var substansförlusterna oförändrade jämfört med vid den första mätningen. Att förändringen ska vara obefintlig verkar orimligt men då temperaturerna redan var på en tydligt nedåtgående trend är det rimligt att substansförlusterna var låga under andra perioden.

Det redan fuktiga och mindre färska materialet i Vagersta är troligtvis orsaken till att brandrisken var obefintlig. Enligt denna studie behöver man inte överväga utökade försiktighetsåtgärder när det gäller brandrisk för en stack med dessa ingångsvärden.

Energiförlusterna var i genomsnitt 6,6% för den otäckta delen och 3,5% för den täckta delen. Jämfört med stacken i Nykvarn så var förlusterna lägre vilket kan motiveras med att materialet var mindre färskt. Ett redan fuktigt material som i detta fall kan bidra till ökade substansförluster då fukthalt är en viktig faktor för att driva detta. Dock så blir inte nederbörd en katalysator för kraftiga temperaturökningar. Höga temperaturer som i Nykvarn kan leda till brandrisk, det innebär även att svårlösta bindningar kan frigöras genom kemisk oxidation vilket i sin tur leder till ökade substansförluster. Det är därför svårt att avgöra utifrån denna studie om en hög eller låg fukthalt som ingångsvärde är mest gynnsamt ur ett lagringsperspektiv. Ökade transportkostnader vid höga fukthalter kan dock vara en viktig faktor för helhetsbilden. Energibesparingarna för täckta stackar var väldigt snarlik både i Nykvarn och Vagersta. Lagringen i Vagersta var en månad längre men också ett mindre färskt material. Att skydda en torr stack verkar därför ge liknande energibesparande effekt som att skydda en fuktig. 3 procentenheter energibesparing kan vara ett rimligt schablonvärde då båda stackarna i denna studie påvisade ungefär den siffran.

Vid beräkning av energivärden förutsattes som tidigare nämnt att rök-gaskondensering används effektivt vilket finns på de flesta större kraftvärmeverk. Detta gör att högre fukthalter inte ger större energiförluster, dock så kan besparingarna vara större då vikten minskar. Exempelvis om fukthalten minskat från 50% till 40% så har 1/3 av vattnet försvunnit vilket innebär att totalvikten minskat med 1/6.

## 6. Slutsatser

- **Nederbörd kan leda till höga temperaturer i en stack med låg fukthalt.**

I en torr och färsk stack som i Nykvarn kan nederbörd vara en katalysator för höga temperaturer och hög nedbrytningstakt i början av lagringstiden. I samband med detta är brandrisken som störst. Det är svårt för de nedre delarna att få ta del av fukten från nederbörd i detta fall och därför kan höga temperaturer uppstå i de nedre delarna av stacken senare under lagringstiden. I en redan fuktig stack som i Vagersta så agerar inte nederbörden som katalysator och därför blir det inga kraftiga temperaturökningar i samband med nederbörd.

- **Nederbörd leder till högre substansförluster på kort eller lång sikt beroende på stackens fukthalt.**

I den torra stacken i Nykvarn blev substansförlusterna stora initialt på grund av nederbörd men takten på nedbrytning avtog rejält efter ungefär 2 månader.

I den fuktiga stacken i Vagersta innebar inte nederbörden ökade substansförluster de första 3 månaderna, att stacken återfuktades gjorde dock att takten på nedbrytning inte minskade i samma utsträckning som i den täckta delen. Efter 7 månader var därför substansförlusterna högre i den otäckta delen.

- **Vind kan leda till lägre temperaturer men substansförlusterna är liknande eller högre.**

I Nykvarn gjorde troligtvis ökade luftflöden att temperaturen vid den nedre mätpunkten att temperaturerna nådde sin lägsta punkt vid första nederbörden.

Substansförlusterna var trots låga temperaturer som störst vid denna period.

I Vagersta var den södra sidan i större utsträckning exponerad mot vind än den norra och påvisade lägre temperaturer. Hur substansförlusterna påverkades var inte entydigt.

- **Värmevärden och askhalt ökar under lagring.**

Då lättflyktigt material med låga energivärden bryts ned först så ökar värmevärdena under lagring. Materialet som blir aska bryts ej ner under lagring vilket gör att dess andel av den totala vikten ökar då substansförluster sker.

- **I de täckta delarna var substansförluster och fukthalter lägre.**

Höga fukthalter driver på mikrobiell aktivitet och på så vis substansförluster. Då en stack skyddas mot nederbörd samtidigt som vatten kan lämna stacken minskar substansförlusterna. I Nykvarn var skillnaden påtaglig tidigt medan i Vagersta var skillnaden liten efter 3 månader men ökade sedan. I Vagersta avtog temperaturerna snabbare i de täckta delarna där skillnaderna startade efter 1 månad.

- **För att kunna förutspå vad som kommer att ske under lagring så är stackens ingångsvärden viktigt.**

Den torra och färska stacken betedde sig väldigt annorlunda än den fuktigare och mindre färska stacken.

- **Brandrisk är som störst i en torr och färsk stack strax efter de första tillfällena av nederbörd.**

De högsta temperaturer som registrerades i någon av stackarna var i samband med den första nederbörden vid den övre mätpunkten i Nykvarn, här bör brandrisken ha varit som störst.

- **Energibesparingen av att täcka en stack var liknande i båda fallen, dock olika vägar dit.**

För båda stackarna var energibesparingen omkring 3% av stackens energiinnehåll för hela lagringstiden genom att täcka stacken. Att skillnaderna mellan täckt och otäckt stack uppstod vid olika tillfällen är dock viktigt att ha i åtanke. En torr stack bör täckas även vid kortare lagringstider då den stora skillnaden uppstår tidigt. En fuktig stack drar inte samma nytta av att täckas om lagringstiden är kort.



## 7. Rekommendationer

- En torr och färsk stack är värd att täcka vid korta och långa lagringstider då substansförlusterna kan öka dramatiskt redan vid första nederbörden.
- En fuktig stack är framförallt värd att täcka vid längre lagringstider.
- Brandrisken är som störst efter att en torr, färsk och otäckt stack utsatts för nederbörd.

## 8. Referenser

Alakangas, E., 2009. *Fuel specification and classes, multipart standard*, u.o.: Phydades.

Anerud, E., Jirjis, R., Larsson, G. & Eliasson, L., 2018. Fuel quality of stored wood chips - influence of semi-permeable covering material. *Applied energy*, pp. 628-634.

Arbetskyddsstyrelsens, 1988. *Trämögel*, u.o.: u.n.

Bioenergihandboken, u.d. Novator. [Online]

Available at: <http://www.novator.se/bioenergy/facts/fuelinvest.pdf>

[Använd 11 09 2018].

Eliasson, L., Eriksson, A. & Mohtashami, S., 2017. *Analysis of factors affecting productivity and cost for a high-performance chip supply system*, u.o.: Applied Energy, vol. 185 (P1), pp. 497–505 Elsevier Ltd..

Energimyndigheten, 2009. *Ett nytt ben i det svenska energisystemet, Biobränsle*, u.o.: u.n.

Energimyndigheten, 2017. *Energiläget 2017*, u.o.: u.n.

Energimyndigheten, 2017. *Produktion av oförädlade trädbränsle 2016*, u.o.: Energimyndigheten.

Gunnarsson, C., Anerud, E. I. W. M., Jonsson, N. & Segerborg-Fick, A., 2016. *Optimerad lagring av biomassa*, u.o.: JTI.

Guo, W., 2013. *Self-Heating and Spontaneous Combustion of Wood Pellets during Storage*, u.o.: The University of British Columbia.

Institute, S. S., 2010. Part 1: General requirements. *Solid biofuels - Fuel specifications and classes*.

Jonsson, N. & Jirjis, R., 1997. *Torrsubstansförluster och mikrobiell aktivitet vid lagring av salixflis*, u.o.: SLU.

Krigstin, S. & Wetzel, S., 2016. A review of mechanisms responsible for changes to stored woody biomass fuel. *Fuel*, pp. 75-86.

Lehtikangas, P., 1999. *Lagringshandbok för trädbränslen*. 2:a red. u.o.:SLU.

Naturvårdsverket, 2005. *Förbränningsanläggningar för energiproduktion inklusive rökaskkondensering*, u.o.: Naturvårdsverket.

Regeringskansliet, 2017. Det klimatpolitiska ramverket.

Ringman, M., 1995. *Trädbränslesortiment*, u.o.: SLU.

Skogsstyrelsen, 2017. *Skogsstyrelsen*. [Online]

Available at: <https://www.skogsstyrelsen.se/bruka-skog/godsling/askaterforing/>  
[Använd 06 08 2018].

Skogsstyrelsen, 2018. *Skogsstyrelsens statistikdatabas*, u.o.: u.n.

SLU, 2017. *SKOGDATA 2017*, u.o.: SLU.

Träguiden, 2017. *Träguiden*. [Online]

Available at: <https://www.traguiden.se/om-tra/byggfysik/fukt/fukt/fuktkvot-och-matning/>  
[Använd 06 08 2018].

Vida, u.d. GROT den stora energireserven.

SLU  
Institutionen för energi och teknik  
Box 7032  
750 07 UPPSALA  
Tel. 018-67 10 00  
pdf.fil: [www.slu.se/energioghteknik](http://www.slu.se/energioghteknik)

SLU  
Department of Energy and Technology  
P. O. Box 7032  
SE-750 07 UPPSALA  
SWEDEN  
Phone +46 18 671000